



Polyana Sá Menezes da Silva

**Dinâmica Costeira do Litoral De Tutóia (MA), a
partir da Análise Multitemporal de Imagens de
Satélite e do Uso de Geoprocessamento**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Geografia da PUC-Rio como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre em Geografia

Orientador: Prof. Luiz Felipe Guanaes Rego
Co-orientador: Prof. Sérgio Cadena de Vasconcelos

Rio de Janeiro
Junho de 2018



Polyana Sá Menezes da Silva

Dinâmica Costeira do Litoral De Tutóia (MA), a partir da Análise Multitemporal de Imagens de Satélite e do Uso de Geoprocessamento

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geografia da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Geografia do Departamento de Geografia e Meio Ambiente da Puc-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Luiz Felipe Guanaes Rego

Orientador

Departamento de Geografia e Meio Ambiente - Puc-Rio.

Prof. Sérgio Cadena de Vasconcelos

Co-orientador

Departamento de Geografia e Meio Ambiente - Puc-Rio.

Prof. Marcelo Motta de Feitras

Departamento de Geografia e Meio Ambiente - Puc-Rio.

Prof. Rodrigo Coutinho Abuchacra

Departamento de Geografia - UERJ(FFP).

Prof. Augusto Cesar Pinheiro da Silva

Coordenador Setorial de Pós-Graduação e Pesquisa:

Rio de Janeiro, 14 de Junho de 2018

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Polyana Sá Menezes da Silva

Graduou-se no curso de Licenciatura e Bacharelado em Geografia pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA) em 14 de fevereiro de 2015.

Ficha Catalográfica

Silva, Polyana Sá Menezes da

Dinâmica costeira do litoral de Tutoia (MA), a partir da análise multitemporal de imagens de satélite e do uso de geoprocessamento / Polyana Sá Menezes da Silva ; orientador: Luiz Felipe Guanaes Rego ; co-orientador: Sérgio Cadena de Vasconcelos. – 2018.

112f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Geografia e Meio Ambiente, 2018.

Inclui bibliografia

1. Geografia – Teses. 2. Dinâmica costeira. 3. Campo de dunas. 4. Geoprocessamento. 5. Sensoriamento remoto. 6. Evolução multitemporal. I. Rego, Luiz Felipe Guanaes. II. Vasconcelos, Sérgio Cadena de. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Geografia e Meio Ambiente. IV. Título.

CDD: 910

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à minha mãe Joselena, pelos constantes incentivos aos estudos, força e por ser o meu exemplo de determinação. Ao meu pai Raimundo e a minha segunda mãe Célia que sempre me apoiaram nas decisões que tomei na vida, obrigada pelo amor, dedicação e encorajamento.

Um agradecimento especial aos meus orientadores Prof. Luís Felipe Guanaes e Prof. Sérgio Cadena de Vasconcelos que disponibilizaram de forma generosa seu tempo e conhecimento. Obrigada pela dedicação na construção desta dissertação, pela disponibilidade e apoio.

Ao meu namorado, Lucas, por ter estado ao meu lado durante toda essa jornada, principalmente por me acompanhar nos trabalhos de campo. Obrigada pelo apoio e suporte emocional, sou imensamente grata por ter sido em primeiro lugar, meu amigo.

Gostaria de agradecer também à Capes pelo apoio financeiro através da bolsa de isenção de mensalidade que permitiu que fizesse parte do quadro de alunos de Pós- Graduação.

À Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro pelo curso de Pós-Graduação em Geografia que me possibilitou alcançar uma importante etapa em minha vida, o Mestrado. Assim como aos professores qualificados que contribuíram com minha formação acadêmica e profissional, sou grata por serem sempre prestativos e dedicados à docência.

Resumo

Silva, Polyana Sá Menezes da; Rego, Luiz Felipe Guanaes; Vasconcelos, Sérgio Cadena de. **Dinâmica Costeira do Litoral De Tutóia (MA), a partir da Análise Multitemporal de Imagens de Satélite e do Uso de Geoprocessamento.** Rio de Janeiro, 2018. 112p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Geografia e Meio Ambiente, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A paisagem costeira presente no Litoral Oriental do Maranhão tem como um de seus elementos campos de dunas móveis, compondo um ambiente dinâmico que expressa alterações significativas tanto espaciais quanto temporais. Como parte dessa paisagem, o litoral de Tutóia apresenta feições eólicas relativamente próximas à linha de costa resultantes da ação conjugada de ondas, correntes costeiras, ação fluvial, variações do nível do mar e fatores climáticos que contribuíram para a configuração da atual paisagem costeira ao longo do tempo. Por estar inserida na Área de Proteção Ambiental do Delta do Parnaíba, a área de estudo merece destaque por sua importância socioeconômica e ambiental, o que justifica o desenvolvimento de estudos que contribuam para um melhor entendimento dos processos e da dinâmica que atuam na região. O presente trabalho tem como principal objetivo identificar alterações que ocorreram na paisagem costeira do município de Tutóia (MA), associadas aos processos de erosão e progradação da linha de costa e a dinâmica de evolução do campo de dunas ao longo dos últimos 23 anos. Espera-se com isso contribuir para o melhor conhecimento da dinâmica do Litoral Oriental maranhense fornecendo informações que sirvam de subsídio para futuros projetos de preservação e ordenamento do uso e ocupação da zona costeira. Para o desenvolvimento da pesquisa foram analisadas imagens de satélite (1994 a 2017) e elaborado uma série temporal por meio de técnicas de geoprocessamento, como sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas (SIG). Os resultados implicam em um mapa da evolução multitemporal dos campos de dunas móveis, onde houve um aumento na velocidade de deslocamento das dunas e na erosão da linha de costa, o que possibilitou identificar a significativa influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que quando submetida à anomalia Temperatura da Superfície do Mar (TMS) e ocorrência do El Niño, interfere na região Nordeste do Brasil, aumentando o período de escassez de chuvas e a intensidade dos ventos alísios, sendo estas as causas do aumento da velocidade de migrações

de dunas nos períodos analisados. A presente dissertação reuniu importantes informações a respeito da dinâmica costeira local, principalmente em um trecho do litoral com escassez de informação, mas, é importante dar continuidade aos estudos desenvolvidos na área, aprofundando o conhecimento acerca do comportamento desses ambientes tendo em vista o planejamento das ações relacionadas aos processos de ocupação e exploração dos recursos naturais e que se almeje o desenvolvimento equilibrado, respeitando as intensa variabilidade do ambiente costeiro.

Palavras chaves

Dinâmica Costeira; Campo de dunas; Geoprocessamento; Sensoriamento remoto; Evolução multitemporal.

Abstract

Silva, Polyana Sá Menezes da; Rego, Luiz Felipe Guanaes; Vasconcelos, Sérgio Cadena de. (Advison) **Coastal Dynamics of the Coast of Tutóia (MA) littoral, from the Satellite Images Multitemporal Analysis and the Use of Geoprocessing.** Rio de Janeiro, 2018. 112p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Geografia e Meio Ambiente, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The coastal landscape present in the Eastern Coast of Maranhão has dune fields as one of its elements, composing a dynamic environment that expresses significant spatial and temporal changes. As part of this landscape, the littoral of Tutóia exhibits eolian features relatively near to the coastline resulting from the combined action of waves, coastal currents, fluvial action, sea level variations and climatic factors that contributed to the current coastal landscape configuration over time. Being inserted in the Environmental Protection Area of Parnaíba Delta, the study area deserves attention because of its socioeconomic and environmental importance, which justifies the development of studies that contribute to a better understanding of the processes and dynamics that operate in the region. The present work main objective is to identify changes that occurred in the coastal landscape of Tutóia (MA) city, associated with the coastline erosion and progradation processes and the dune fields evolution dynamics over the last 23 years. It is expected to contribute to a better knowledge of the Eastern Coast of Maranhão dynamics by providing information that will serve as a subsidy for future preservation and planning the use and occupation projects of the coastal zone. For the research development, satellite images (1994 to 2017) were analyzed and a time series was elaborated through geoprocessing techniques such as remote sensing and geographic information systems (GIS). The results imply a multitemporal evolution map of the mobile dune fields, where had an increase on the dune displacement velocity and on the coastal line erosion, which allowed identifying the significant influence of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ), which when subdued to the Sea Surface Temperature (SST) anomaly and the El Niño occurrence, interferes in Brazil northeast region, increasing the rain scarcity period and the trade winds intensity, being these the causes of the dune migration velocity increase in the analyzed period. The present dissertation gathered important information about the local coastal dynamics, especially in a stretch of the coast with scarce information, however, it is important to continue the studies developed in the area, deepening

the knowledge about the behavior of these environments owing to the planning of actions related to the occupation and exploitation of natural resources processes and that a balanced development is craved, respecting the intense variability of the coastal environment.

Keywords

Coastal Dynamics; Dune Fields; Geoprocessing; Remote Sensing; Multitemporal Evolution.

Sumário

1 . Introdução	16
2 . Justificativa e Objetivos	20
3 . Fundamentação Teórica	22
3.1. Evolução das zonas costeiras	22
3.1.1. Praias	23
3.1.2. Erosão costeira	26
3.1.3. Dunas	29
3.2. Geoprocessamento	36
3.2.1. Sistemas de Informação Geográfica (SIG)	37
3.2.2. Sensoriamento Remoto	39
4 . Área de Estudo	46
4.1. Localização	46
4.2. Contexto do Plano diretor e APA do Delta do Parnaíba	49
4.3. Geologia e Geomorfologia	55
4.3.1. Morfodinâmica eólica dos sedimentos quaternários.	59
4.4. Aspectos Climáticos	63
4.5. Fatores oceanográficos.	69
5 . Materiais e Métodos	72
5.1. Levantamento de dados bibliográfico e cartográfico	72
5.2. Levantamento de Campo	72
5.3. Sensoriamento Remoto	73
5.3.1. Preparação da base cartográfica e Aquisição das imagens	73
5.3.2. Pré-processamento	75
5.3.3. Processamento de imagens e Elaboração de mapas temáticos	76
6 . Resultados e discussões	84
6.1. Linha de Costa	84
6.2. Análise da migração das dunas através da utilização de imagens de satélite	89
6.2.1. Análise da migração das dunas na sede do Município de Tutóia	91
6.2.2. Duna solitária	91

6.2.3. Duna 1 - sede do município	95
6.2.4. Duna 2 – Bairro Cajueiro	99
7 . Considerações Finais	103
8. Referências bibliográficas	106

Lista de figuras

Figura 1: Formas de perdas e ganhos de areias de uma praia.	23
Figura 2: Esquema dos tipos de praia dissipativa, refletiva e intermediária, proposto por Wright & Short (1983)	24
Figura 3: Disposição de uma duna barcana e seus principais elementos.	31
Figura 4: Imagem de duna barcana isolada com a presença de esteiras de dunas evidenciando sua migração, presentes na parte oeste do campo de dunas da área de trabalho.	32
Figura 5: Disposição de dunas transversais de crista reta (2D) e seus principais elementos.	33
Figura 6: Dunas transversais em movimento de cavalgamento sobre o campo de dunas parabólicas fixas pela vegetação, localizadas no campo de dunas da área de trabalho.	33
Figura 7: Cordões longitudinais formados por transformações de dunas, barcanas e transversais.	34
Figura 8: Elementos de dunas parabólicas.	35
Figura 9: Duna parabólica com pouca disposição de vegetação em seus braços (caudas), presente na sede do município de Tutóia.	35
Figura 10: Mapa de Setorização da Zona Costeira do Estado do Maranhão (ZCEM)	46
Figura 11: Localização da área de estudo no estado do Maranhão	48
Figura 12: Avanço das dunas em direção às residências no bairro São José, localizado na praia da Barra.	50
Figura 13: Calçamento danificado por conta da erosão na Praia da Barra.	50
Figura 14: Bairros visitados na sede do município de Tutóia que constam citados no Plano Diretor como 8º Polo de planejamento de desenvolvimento a curto e médio prazo.	51
Figura 15: Localização da APA do Delta do Parnaíba em verde. Principal braço do rio Parnaíba é o limite entre os estados do Maranhão e Piauí.	52
Figura 16: Arcabouço Estrutural da Bacia de Barreirinhas.	56
Figura 17: Recorte da Carta Geológica da Bacia de Barreirinhas: Recorte da Carta Geológica da Bacia de Barreirinhas.	58
Figura 18: Configuração geral das parias de Tutóia, apresentado inclinação moderada, alta amplitude de maré e baixa altitude de ondas.	61

Figura 19: A praia de Tutóia, dominada por maré que antecede e forma o campo de dunas transgressivas, possui orientação leste-oeste.	62
Figura 20: Rosa dos ventos com base de dados INMET, para a estação do Aeroporto de São Luís, construída no software WRPLOT.	65
Figura 21: Média do total mensal da temperatura do ar e chuvas registrados entre 1970 e 2010, dados do INMET (Estação de São Luís)	66
Figura 22: Rosa dos ventos com base de dados INMET, para a estação Farol Preguiças no Parque dos Lençóis Maranhenses, construída no software WRPLOT.	67
Figura 23: Média do total mensal da direção e velocidade do vento registrados entre 1970 e 2010, dados do INMET (Estação de São Luís)	67
Figura 24: Curva de maré em Tutóia entre dezembro de 2008 e novembro de 2009. DHN (Departamento de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil).	71
Figura 25: Composição colorida para realce das dunas.	77
Figura 26: Área de trabalho ArcGis 10.2.2 com as 32 linhas traçadas no sentido N-S, com espaçamento de 150m entre elas, para calcular a área de cada polígono.	79
Figura 27: Detalhamento dos pontos coletados em campo e sua localização na área de estudo.	81
Figura 28: Disposição do litoral do município de Tutóia e a entrada de ventos de E-NE (setas em vermelho).	82
Figura 29: Face de Deslizamento de uma duna em relação à direção do vento.	82
Figura 30: Medida da distância entre as faces de deslizamento em metros (representada pela seta) levando em consideração a direção do vento ENE-WSW. Imagem tirada da área de trabalho do Arcgis 10.2.2.	83
Figura 31: Área erodida e progradada entre os anos de 1994 e 2017, onde é visível a predominância de erosão no período estudado	84
Figura 32: Imagens selecionadas para análise Linha de Costa	85
Figura 33Pontos monitorados para vetorização da Linha de Costa no período de 1994 a 2017	86
Figura 34: Migração das dunas (1994-2017) com predominância de dunas Barcanas e Transversais	90
Figura 35: Migração das dunas na Sede do município de Tutóia	93
Figura 36: Deslocamento da Duna Solitária por período estudado	94
Figura 37: Deslocamento de Duna Parabólica (Duna 1) na sede do município	97

Figura 38: Residência construída nos últimos 4 anos que já apresenta interferências causadas pelo deslocamento da Duna Parabólica – Janeiro de 2017	98
Figura 39: Residência comprometida pelo avanço da Duna Parabólica - Janeiro de 2017	98
Figura 41: Migração de duna no bairro Cajueiro	100
Figura 42:Residência 2 já comprometida pelo avanço da duna	101
Figura 43:Residência 4, sofrendo influência pelos fundos da residência.	101
Figura 40: Distribuição de chuvas no ano de 2015.	102

Lista de tabelas

Tabela 1: Nomenclatura utilizada para feições eólicas da Planície Costeira do Maranhão.	30
Tabela 2: Matriz de Problematização da APA do Delta do Parnaíba.	53
Tabela 3: Plano de Ação da APA do Delta do Parnaíba.	53
Tabela 4: Sumário de um Esquema para Classificação Morfodinâmica das Praias incorporando os efeitos da maré.	60
Tabela 5: Ocorrência histórica do El Niño e La Niña.	68
Tabela 6: Especificações imagens Landsat selecionadas	74
Tabela 7: características e aplicações das bandas espectrais imagens Landsat 5TM	74
Tabela 8: Características das imagens do satélite Landsat 8	75
Tabela 9: Valores das áreas erodidas e progradadas, média de erosão e velocidade média para os períodos estudados.	87
Tabela 10: Valores de deslocamento e velocidade por período estudado.	92
Tabela 11: Valores de deslocamento e velocidade por período estudado.	95
Tabela 12 :Valores de deslocamento e velocidade por período estudado.	99

Lista de Siglas

APA – Área de Proteção Ambiental

CPMR - Serviço Geológico do Brasil

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis.

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas

GPS - Global Positioning System

MMA – Ministério do Meio Ambiente

PDI - Processamento digital de imagem

PNLM – Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses

SEMA-MA - Secretaria de Estado de Meio Ambiente do Maranhão

SIG - Sistema de Informações Geográficas

SAD-69 - South American Datum Espaciais

TSM - Temperatura da Superfície do Mar

ZCEM - Zona Costeira do Estado do Maranhão

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

ZEE - Zoneamento Ecológico-Econômico

1. Introdução

Uma grande porção da população mundial vive ao longo das zonas litorâneas, no Brasil os municípios costeiros concentram mais de 40 milhões de habitantes e tiveram um crescimento considerável nas últimas cinco décadas (SHORT & KLEIN, 2016), o que resultou em uma rápida expansão das cidades existentes em alguns casos com o crescimento de centros turísticos, hotéis e resorts de alto padrão. Os ambientes costeiros são regiões muito suscetíveis aos impactos tanto das pressões humanas quanto das naturais associadas principalmente as mudanças climáticas e variações do nível do mar (MUEHE, 2006).

Alguns grandes centros urbanos cujas populações somam milhões de habitantes (IBGE, 2014), a exemplo das 10 maiores cidades do Brasil, 5 das quais localizadas no litoral ou influenciadas pelo mar. Nesse contexto, também existem milhares de municípios menores, a maioria deles com menos de 100 mil habitantes, onde parte significativa dessa população está ocupada em atividades, direta ou indiretamente, ligadas ao turismo, produção de petróleo e gás natural, pesca e serviços que atendem à dinâmica econômica gerada por esses municípios e outros próximos à zona costeira (PBMC; 2013).

Em muitos ambientes as diferentes modalidades de ação do homem já acarretaram transformações irreversíveis ao ambiente natural, provocando alterações radicais da paisagem, principalmente onde se verificam altas concentrações populacionais. No entanto, esses ambientes são dinâmicos e também podem se adaptar e se transformar através dos processos naturais de seus diferentes componentes, os quais se articulam e interagem através de mecanismos de funcionamento e interdependência (SOUZA, 2007). As áreas mais sensíveis e com maior risco são aquelas com que apresentam um crescimento na densidade demográfica significativo, que no caso do Brasil cidades costeiras das regiões Nordeste, Sudeste e Sul, por conta das alterações climáticas que tem intensificado alguns eventos como a elevação do Nível Relativo do Mar e Temperatura da Superfície do Mar, e intensificação dos eventos do El Niño e La Niña (MAGRIN *et al.*, 2014).

O Maranhão possui o segundo mais extenso litoral do Brasil e da Região Nordeste, superado apenas pelo Estado da Bahia, sendo dividido em Litoral Ocidental, o Golfão Maranhense e o Litoral Oriental, este último onde se localiza o litoral do município de Tutóia que compreende a área entre o Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses e o Delta do Parnaíba, caracterizado principalmente pela presença de campos de dunas móveis e manguezal.

A intensa atividade das ondas, marés e correntes litorâneas no conjunto dos processos geomórficos e a proximidade do Delta do Parnaíba favorecem o aporte de sedimentos arenosos para a praia. Sedimentos esses que ficam à disposição da ação eólica e com a ajuda de rajadas intermitentes de intensidades variáveis, são selecionados e transportados para a costa formando praias e dunas (PAULA, 2003).

No litoral de Tutóia, pode-se constatar que o caráter sazonal da pluviosidade provoca deficiência hídrica por um período médio de cinco meses, no período de agosto a dezembro. Neste período é notável a intensa atividade dos agentes climáticos, aceleram-se os eventos de natureza eólica em todas as áreas desprovidas de cobertura florestal ou de estruturas humanizadas. (GONÇALVES, 1997).

A dinâmica costeira natural na área de estudo é observada e descrita pelos próprios moradores, através do aumento de bancos de areia no mar próximo à praia, uma intensa alimentação de sedimentos provenientes do rio Parnaíba do campo de dunas móveis, como descrito por Paula (2013), e avanço dessas dunas em direção às residências em bairros localizados no litoral que apesar de se tratar de um fenômeno natural, traz diversos prejuízos à comunidade local por conta da ocupação urbana irregular, o mais comum é perda dos imóveis, fazendo com que os moradores mudem-se constantemente.

A presente pesquisa, além de caracterizar a dinâmica natural deste ambiente costeiro e a evolução do uso e cobertura do solo, produziu conhecimentos acerca do município. Essas informações por explicar o comportamento dos agentes morfogenéticos, bem como as transformações que vêm ocorrendo, poderão subsidiar estudos futuros quanto ao planejamento do uso mais adequado do espaço geográfico local.

São poucos e restritos os trabalhos voltados para os estudos de morfodinâmica da paisagem aplicados a este trecho do litoral maranhense no que se refere à interação dos agentes e processos modeladores da paisagem. Encontram-se trabalhos como de Maranhão (2003), Gonçalves *et al.* (2005), cuja escala de abordagem não permite a compreensão razoável da dinâmica da

paisagem e envolvem de uma forma geral litoral maranhense, haja vista que a intensidade da ação dos agentes responsáveis pelos processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos determina rápidas transformações da paisagem costeira.

As abordagens relacionadas a este espaço, tanto na área costeira como nas áreas centrais do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses, inserem-na em estudos de caráter mais regionais notadamente nos espaços costeiros relacionados aos diferentes fatores ambientais, associando dados e informações obtidos através de sensores remotos com outros produzidos no campo e em laboratório a exemplo de Santos (2008) e Araújo (2015).

A falta de conhecimento ambiental e das legislações, tais como Zoneamento Costeiro, Zoneamento Ecológico-Econômico e delimitação de Área de Proteção Ambiental, bem como a ausência de fiscalização por parte dos órgãos competentes, acarretam em impactos na vida da população e no ambiente. No Brasil há uma sobreposição da administração da gestão da praia, legislações federais, estaduais e locais que vezes não concordam entre si, levando a possíveis conflitos e gerenciamento ineficiente, bem como uso privado do espaço público (SCHERER, 2013).

A legislação brasileira considera dunas de areia apenas como um dos elementos das praias e estudadas à parte, levando a uma gestão fragmentada dos ecossistemas enquanto deveriam ser consideradas parte integrante do balanço sedimentar de uma praia, a gestão destas depende também da conservação das dunas (SCHERER, 2013). Como consequência, há muitos desafios no manejo costeiro e de praia no Brasil, incluindo propriedade da terra, regulando o turismo e projetos urbanos, conservação da biodiversidade e controle de erosão.

Visando atenuar os impactos gerados pelo uso irracional dos recursos naturais, torna-se necessário o conhecimento integrado da paisagem, como forma de adequar as transformações impostas pelo homem às potencialidades do meio.

Esta condição salienta a necessidade de realização de pesquisas que possam subsidiar o planejamento da ocupação e uso do solo, recursos naturais e das estruturas humanas, apoiadas com uso do geoprocessamento que tende ser um facilitador na observação e apuração de dados geográficos como os trabalhos de Santana (2015) e Silva (2013).

O uso da tecnologia de SIG's (Sistema de Informação Geográfica) é vasto, podendo esta envolver diferentes aplicações, desde o extenso campo do

planejamento territorial, até os trabalhos em escalas menores, com destaque para os estudos de variabilidades e impactos ambientais, monitoramentos, e zoneamentos.

A existência de imagens de sensores remotos de diferentes épocas converte a análise multitemporal em uma excelente ferramenta para auxiliar estudos geomorfológicos costeiros, ao estender informações pontuais de uma área para um contexto geográfico, possibilitando o entendimento da história evolutiva desses sistemas. Os ambientes costeiros estão na interface entre o continente e o oceano, se caracterizando como local de forte dinamismo, coordenado pelas variações energéticas dos processos naturais de diferentes escalas espaciais e temporais.

Conforme os pressupostos acima colocados, o uso do Geoprocessamento e torna fundamental para a pesquisa, pois a paisagem não é a simples adição de elementos geográficos disparatados.

Por conta da importância ambiental desse trecho do litoral pela presença de vegetação de mangue e vegetação pioneira, relações ecológicas entre flora e fauna, e socioeconômica para a comunidade local que praticam o extrativismo (pesca) e atividades que exploram o ecoturismo, o Litoral do município de Tutóia, necessita de mais estudos acerca do comportamento dos ambientes que compõe a planície costeira com o objetivo de melhor conhecer os mecanismos responsáveis pelo desenvolvimento dos processos modeladores da paisagem na área em referência.

2. Justificativa e Objetivos

A ocupação humana no litoral do município de Tutóia no Maranhão tem sido afetada ao longo do tempo pelas modificações da linha de costa, principalmente em função do movimento de dunas. Tais impactos resultam da falta de conhecimento dos moradores a respeito da própria dinâmica costeira local, o que leva a construção de residências em locais altamente dinâmicos, e da falta de atuação das instituições governamentais no gerenciamento do uso e ocupação desse espaço.

Por esses motivos é de extrema importância trabalhos que busquem levantar e discutir o comportamento dos processos costeiros atuantes na planície costeira que permitam compreender a relação destes com as formas de ocupação e intervenção humana.

Em recente levantamento bibliográfico realizado para esta pesquisa, percebe-se a ausência de estudos que contemplem a dinâmica e os processos naturais na área, sendo encontrado apenas estudos de caráter regional associados ao Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses, dificultando um melhor planejamento das ocupações e exploração dos recursos naturais que contribuem nas atividades econômicas, como a pesca, e principalmente o ecoturismo.

A observação temporal das mudanças da paisagem é importante para entender a dinâmica ambiental e as relações estabelecidas homem e o espaço natural, nesse impasse uso de geotecnologia se torna uma ótima ferramenta que possibilita interpretações e o acompanhamento o acompanhamento temporal das transformações ocorridas em um determinado intervalo de tempo. Para este trabalho o recorte temporal foi escolhido de acordo com qualidade de imagens de satélite disponível (1994-2017) que permitisse a visualização da evolução da paisagem e identificação dos processos naturais da área de trabalho.

Neste contexto, o presente estudo tem como principal objetivo identificar alterações que ocorreram na paisagem costeira do município de Tutóia (MA), associadas aos processos de erosão e progradação da linha de costa e a dinâmica de evolução do campo de dunas ao longo dos últimos 23 anos.

Espera-se com isso contribuir para o melhor conhecimento da dinâmica do Litoral Oriental maranhense fornecendo informações que sirvam de subsídio para futuros projetos de ordenamento do uso e ocupação da zona costeira. Para isso serão desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- Reunir série temporal de imagens Landsat TM 5+ e 8 ao longo de 23 anos (1994 a 2017).
- Mapear as alterações morfológicas ocorridas no litoral ao longo do intervalo de tempo estudado.
- Analisar os processos morfodinâmicos associados a erosão, progradação e migração das dunas e sua consequência para as atividades humanas.

3. Fundamentação Teórica

3.1. Evolução das zonas costeiras

O período do Quaternário é um dos mais importantes em termos de variações climáticas globais e flutuações do nível do mar, desempenhando um papel fundamental na formação das zonas costeiras e planícies sedimentares. Por esse motivo, a partir desse período esses processos ficaram mais evidentes. (SUGUIO *et al.*, 1985; BIRD, 2008)

Desde o Quaternário o clima é um dos principais fatores na formação e modificação das zonas costeiras por controlar os regimes de chuva, vento e interagir com os fatores de ondas, correntes e marés, mas também recebe influência de fatores morfogênicos, geológicos e geomorfológicos, que determina o padrão de afloramentos de rocha na costa, no fundo do mar e no interior da planície costeira. (BIRD, 2008; Paula, 2013)

A interação desses agentes e processos é o que forma os sistemas costeiros, e segundo Morais (1996) são os fornecedores de sedimentos. Alguns ambientes costeiros estão ganhando ou perdendo sedimentos (erosão e progradação) e alguns casos os sedimentos mantem-se migrando ao longo da costa.

Bird (2008) afirma que as planícies costeiras podem receber seus sedimentos de várias fontes o que pode determinar a sua origem analisando suas características mineralógicas, bem como aos padrões de fluxo de sedimentos produzidos por ondas e correntes (Figura1). O mais comum são materiais derivados da erosão de afloramentos próximos de penhascos e de encostas, e os levados à costa pelos rios.

Ainda de acordo com o autor, grandes rios que drenam uma bacia hidrográfica tendem a produzir sedimentos em abundância, esses por sua vez são transportados para a plataforma rasa, onde são trabalhados por ondas e correntes, e depois incorporados nas praias.

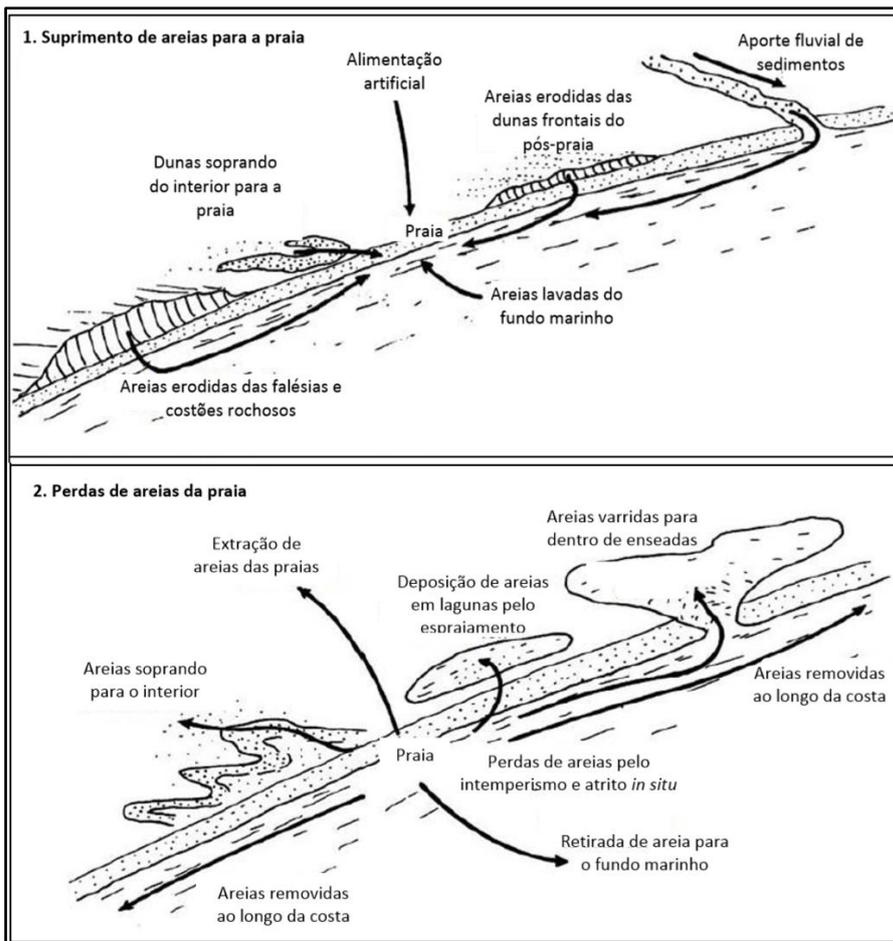


Figura 1: Formas de perdas e ganhos de areias de uma praia.
 Fonte: Adaptado de Bird (2008)

3.1.1. Praias

Klein & Short (2016) classificaram as praias brasileiras em três estados, dissipativo, refletivo e intermediário, com base na *Varição Relativa de Marés* (Relative Tide Range, RTR) proposto por Masselink & Short (1993), levando em conta a equação:

$$RTR = TR/H_b$$

Onde: **TR** é o intervalo médio de maré sizígia (m), e **H_b** é a altura significativa das ondas na arrebentação (m)

Quando as ondas são relativamente altas e as marés baixas e as RTR <3 as praias são **dominadas por ondas**. Entre 3 e 10 são **modificados pela maré**; e quando as ondas são muito baixas e as marés relativamente altas e o RTR está entre ~ 10 e ~ 50 elas se tornam **dominadas por maré**. (KLEIN & SHORT, 2016).

Os $RTR < 3$, corresponde aos três tipos de praia de micromaré propostos por Wright & Short (1983) – dissipativa, refletiva e intermediária (Figura 2). Para $3 < RTR < 7$, Paula (2013) concluiu que as praias de baixa energia começam apresentando característica refletiva por ocasião da preamar e a presença de um terraço de baixamar sem correntes de retorno.

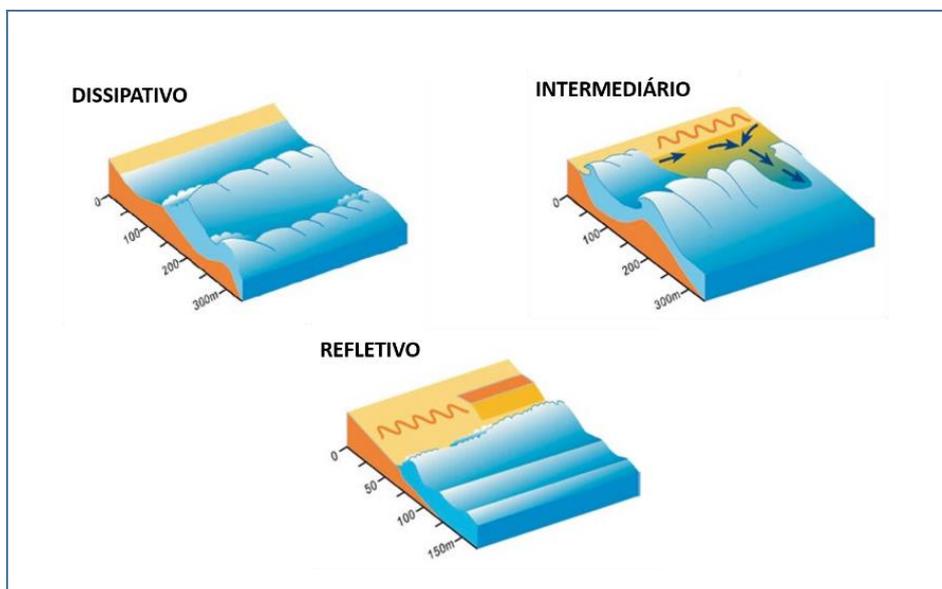


Figura 2: Esquema dos tipos de praia dissipativa, refletiva e intermediária, proposto por Wright & Short (1983)

Fonte: Adaptado de Klein & Short (2016)

Nessas condições, os três tipos de podem ser classificados em 13 estados de praia levando em consideração a contribuição relativa da onda e período e tamanho de grão de sedimento para a morfodinâmica da praia, o fator (Ω) proposto (Gourlay 1968), onde

$$\Omega = H_b / W_s T$$

Onde: H_b é a altura significativa das ondas na arrebentação (m), W_s é a velocidade de queda do sedimento (m/s^{-1}) e T é o período de onda.

Praias dominadas por ondas pode ser classificado em seis estados de praia. Quando as ondas são relativamente baixas, períodos longos e areia grossa $\Omega < 1$, as praias são estreitas e chamadas de refletivas. Quando as ondas são moderadas a altas ($\Omega = 2-5$), as praias se tornam intermediárias dominadas por *rip* (calha), geralmente com uma ou duas barras cortadas por canais e

correntes. Quando a onda é alta e a areia é fina $\Omega > 6$, as praias tornam-se largas e dissipativas com muitas vezes múltiplas barras de areia paralelas (2–4).

Praias modificadas pela maré passam por uma transição semelhante com a adição de uma amplitude de maré baixa e consistem em três estados de praia). O estado refletivo de energia mais baixa ($\Omega < 1$) consiste em uma praia refletiva de maré alta e um amplo terraço (~ 100 m +) na baixa-mar. O estado intermediário contém uma praia refletiva de maré alta e barra de maré baixa cortada por canais de rip ($\Omega = 2-5$) em seu setor externo de baixa-maré; enquanto o estado de dissipação de energia mais alta apresenta uma praia ultradissipativa côncava de gradiente muito largo (> 200 m) quando $\Omega > 6$.

Praias dominadas por maré consistem em quatro estados, cada um liderado por amplas áreas intermarés e / ou terra lamacenta (100 a 1000 m de largura). Eles variam de uma praia de maré alta de baixa energia, com frente de areia ondulada sob ondas mais altas, até planícies de areia de muito baixa energia, planícies de areia de maré e finalmente planícies de lama de maré.

O litoral oriental do maranhão, Santos (2008) afirma que apresenta estado dissipativo caracterizado pela larga zona de “surf”, baixo gradiente topográfico e elevado estoque de areia. A respeito disso, Pye e Tsoar (2008) afirma que os sedimentos fluviais transportados em longas distâncias são depositados pelo mar nas praias adjacentes de acordo com a declividade da costa.

O transporte de sedimentos ao longo de uma praia arenosa acontece devido principalmente a correntes de deriva litorânea geradas pelas ondas (SUGUIO *et al.* 1985). A formação dos depósitos eólicos depende do transporte dos sedimentos existentes na praia, os quais são transportados em direção ao continente.

Acerca da importância praia para a formação de dunas e campos de dunas Tomazelli (1990), a quantidade de sedimentos dispostos nela e sua morfologia são essenciais para a formação de feições eólicas.

O autor ainda descreve que os grãos de areia em saltação, oriunda da praia, dependem do encontro com algum obstáculo para que as condições adequadas ao acúmulo de uma parte dos sedimentos carregados pelo vento, ocasionando a formação de dunas.

3.1.2.Erosão costeira

A Resolução 1 de 21/11/1990, da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM) apresentou a definição para zona costeira como forma de evitar interpretações múltiplas:

“Área de abrangência dos efeitos naturais resultantes das interações terra-mar-ar, leva em conta a paisagem físico-ambiental, em função dos acidentes topográficos situados ao longo do litoral como ilhas, estuários e baías, comporta em sua integridade os processos e interações características das unidades ecossistêmicas litorâneas e inclui as atividades socioeconômicas que ai se estabelecem.”

Dentre processos e interações que podem ocorrer nesses ambientes, temos a erosão costeira que segundo Suguio (2001) é um processo natural e está associada a diversos fatores que apresentam escala espacial e temporal diversificados, estando intimamente relacionada às variações do nível relativo dos mares. Também pode acontecer o processo de progradação, ambos constituem parte de um ciclo de fenômenos naturais determinado pela energia das ondas e as características geológicas das praias, que orientam as correntes marinhas e o transporte de areia (MUEHE, 2006).

A linha de costa, no Brasil é formada por extensos trechos caracterizados por grandes depósitos marinhos arenosos compostos por inúmeras feições, a erosão costeira tem início quando o material erodido é levado em maior proporção do que é depositado (MORAIS, 1996).

Este processo é um fenômeno que pode ser observado em diferentes zonas costeiras ao longo do mundo todo distinguindo-se necessariamente na forma, tipologia e intensidades de ocorrência. Segundo Luijendijk *et al.* (2018), o estado atual das praias no mundo, indica que 24% das praias arenosas do mundo estão sofrendo erosão com taxas superiores a 0,5 m/ano, enquanto 28% estão em estágio de progradação e 48% são estáveis.

Nenhuma explicação única pode facilmente explicar as tendências observadas de erosão progradação ao longo da costa arenosa global (LUIJENDIJK *et al.*,2018). Sobre as razões da remoção e/ou deposição Morais (1996) classifica a erosão costeira em dois tipos principais, a erosão natural e a erosão induzida direta ou indiretamente pelas atividades humanas.

A erosão natural: a linha de praia é estabelecida como produto da interação entre o suprimento de sedimento, processos costeiros e condições

meteorológicas e oceanográficas, de modo que variações em um desses fatores faz com que a linha de praia recue ou avance.

A respeito dos aspectos naturais, Komar (1983), sugeriu que a erosão costeira é o resultado de uma complexa interação entre os processos físicos, bem como de movimentos combinados de águas, induzidos pelas ondas incidentes e de tempestades, marés e correntes litorâneas, interagindo com a costa.

Eventos meteorológicos extremos (tempestades, furacões e tsunamis) que são fenômenos que podem amplificar as condições do vento, das ondas e causar elevação instantânea do nível do mar causando a perda de suprimento de sedimentos resultante da interrupção ou redução do suprimento para o litoral. Mudanças no regime de chuvas podem tornar um rio em um curso temporário e depositar menos carga sedimentar durante apenas parte do período anual, ou então simplesmente secar e deixar de contribuir para a formação das praias, diminuindo o alargamento das mesmas e facilitando a ação dos processos de erosão.

A erosão induzida direta ou indiretamente pela ação humana: é resultante das formas de intervenção como instalação ou execução de atividades social e econômica no litoral e até mesmo no continente.

Construção de barragens em rios, mineração ou dragagem de areias e cascalhos do leito dos rios, alteração do sistema de drenagem, são os principais causadores da diminuição do suprimento de sedimentos. As atividades dentro d'água perto da praia como a mineração do fundo, construções, estabilização de costas e braços de mar também são atividades contribuintes. A exemplo do delta do Mekong, no Vietnã, o terceiro maior delta do mundo, é cada vez mais afetado pelas atividades humanas e exposto à subsidência e à erosão costeira como exposto por Luijendijk *et al.* (2018).

A construção de estruturas portuárias causando áreas de erosão de praia que impactaram os desenvolvimentos sociais e urbanos locais. No caso de na Vila do Pecém, Ceará, a erosão é consequência da concentração de energia da agitação, Além de alterar o substrato e outras ao equilíbrio morfodinâmico da costa, mudando a batimetria, velocidade e direção das correntes e ondas (MIGINI *et al.*, 2013).

Para Tessler & Goya (2005) as intervenções mais frequentes no litoral brasileiro estão relacionadas ao uso e ocupação do solo, como construção de infraestrutura urbana, como ruas, calçadas e mesmo residências em regiões

inadequadas localizadas ainda sob ação do mar em períodos de tempestades ou variações sazonais do nível médio do mar.

Nem todas as intervenções ocorrem diretamente na linha de costa. Isso porque muitas vezes alterações efetuadas no interior do continente afetam diretamente o aporte sedimentar para a zona costeira. Acerca disso, Muehe (2006) afirma que os rios ou cursos d'água que alimentam a praia com sua carga sedimentar passam a despejar menor ou nula quantidade da mesma, muitas vezes em decorrência da construção de barragens e lagos artificiais em seus leitos ou até mesmo a implantação de outras obras de infraestrutura que modificam o traçado e dinâmica do mesmo.

No geral, a estabilidade das praias acontece quando há um equilíbrio na retirada e alimentação de sedimentos que transitam em determinado trecho. A respeito disso, Muehe (2006) descreve que, a resposta morfológica do perfil de praia será de erosão quando houver déficit sedimentar, ou seja, o volume de sedimentos retirado é maior que o volume retido. No caso inverso, haverá superávit sedimentar e, conseqüentemente, aumento do perfil de praia.

Nos encontramos em um período em que as alterações ambientais por ações ou atividades humanas é cada vez mais onipresente e possui cada vez uma gama maior de tipos de intervenções. Nesse contexto, Jefferson, Wegmann & Chin (2013) chamam a atenção para o tema Geomorfologia do Antropoceno, que tem como foco entender o legado das transformações causadas pelas atividades humanas. Segundo os autores o tema abrange não apenas os efeitos das mudanças humanas individuais, mais também a heterogeneidade e efeitos cumulativos no tempo e no espaço.

3.1.3.Dunas

As dunas costeiras ocorrem praticamente em toda costa brasileira ocorrendo de forma mais frequentes em regiões onde possuem características climáticas com longos períodos de estiagem durante o ano (GIANNINI *et al.* 2005). Em alguns casos funcionam como forma de proteção natural da linha de costa contra a atuação dos agentes oceanográficos extremos, além de serem importantes áreas de recarga de aquíferos nas zonas costeiras. Em forma de campos de dunas formam um ecossistema costeiro altamente dinâmico que podem abrigam uma variedade de espécies mesmo que temporariamente. (CARTER *et al.* 1990; RIBEIRO, 2000). Em relação ao fator de proteção da costa, Silva *et al.* (2004, p. 217), destaca que:

As dunas compõem importante estoque de areias litorâneas, que podem ser remobilizadas pelos processos costeiros, sendo, portanto, de importância estratégica, pois servem de anteparo à erosão durante tempestades. Assim sendo, elas interagem com os processos litorâneos, “emprestando” areias para a praia e para a região da antepraia, permitindo a manutenção de um perfil de equilíbrio.

Conforme Pye (1990) as dunas e campos de dunas possuem seus sedimentos fornecidos por processos marítimos e podem ser derivados de depósitos da própria plataforma continental ou ser fornecida a partir de rios. Muehe (1994) afirma que as dunas costeiras se formam em locais em que a velocidade do vento e a disponibilidade de areias finas são adequadas para o transporte eólico e sua migração ou estabilização dependem das condições prevalentes de vento, onda e suprimento de sedimento disponível.

Existem três requisitos básicos para a formação de grandes mares de areia e campos de dunas considerados por Pye e Tsoar (2008):

- Disponibilidade de uma grande quantidade de areia;
- Energia eólica suficiente para transportar a areia ou retrabalhá-la e
- Condições topográficas e climáticas adequadas mantidas durante um longo período que permitem a acumulação de uma grande espessura de areia.

No litoral oriental brasileiro os ventos que favorecem diretamente os processos de formação dos campos de dunas da região, são os ventos alísios que sopram de maneira constante uma grande quantidade de sedimentos presentes na superfície exposta da praia. (GIANNINI *et al.* 2005)

Em seu estudo Gonçalves (1997) concluiu que a Planície Costeira do Estado do Maranhão possui o maior registro de sedimentação eólica do Quaternário da América do Sul, correspondendo a campos de dunas livres e fixas que juntos alcançam larguras de até 50 km, denominados de Lençóis Maranhenses. Tal acumulação sedimentar está relacionada ao fato da região possuir condições favoráveis como praia com baixa declividade, clima favorável, incidência de ventos alísios e grande disponibilidade de sedimentos fluviais.

Várias são as propostas de classificação de dunas que levam em consideração tanto os aspectos genéticos quanto descritivos, dentre estas as mais conhecidas e usadas McKee (1979), Tinley (1985), Pye e Tsoar (1990) e Hesp (2000). A mais adotada pelos pesquisadores brasileiros é a de McKee (1979) que se fundamenta nos aspectos morfológicos e na organização interna dos corpos de areia.

Baseado na classificação de McKee (1979) e no trabalho de mapeamento geológico e geomorfológico dos Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses (PNLM) desenvolvido por Gonçalves (1997), Gonçalves *et al.* (2003) desenvolveu uma análise das diferentes feições eólica presente no PNLM através de trabalhos de campo e aerofotointerpretação, chegando a uma classificação de dunas livres, fixas e semi-fixas (Tabela 1), e também outras feições eólicas descritas a seguir:

Tabela 1: Nomenclatura utilizada para feições eólicas da Planície Costeira do Maranhão. Fonte: modificada de GONÇALVES *et al.* (2005)

1 - Dunas Livres:	<ul style="list-style-type: none"> • Dunas barcanas • Dunas transversais de crista reta (2D) • Dunas transversais de crista sinuosa (3D) • Draa (duna complexa) • Dunas oblíquas • Cordões longitudinais
2 - Dunas Semi-Fixas (Associadas à Vegetação):	<ul style="list-style-type: none"> • Dunas do tipo “nebkha” • Dunas de sombra “shadow dunes”
3 - Dunas Fixas:	<ul style="list-style-type: none"> • Dunas parabólicas • Cadeias de parabólicas • Dunas transversais
4 - Lençóis de areia	
5 - Esteiras de dunas	
6 - Feições de erosão “blow out”	

3.1.3.1. Classificação de dunas

A partir da classificação proposta por Gonçalves *et al.* (2003) serão descritas as principais feições presentes na área de trabalho, município de Tutóia (MA).

Dunas barcanas

Possui a forma de “meia lua” e são geralmente isoladas, neste tipo de duna móvel, as extremidades (braços) são deslocadas, não a parte central (Figura 3). O rastro de sedimentos é deixado pela porção central da duna e os braços sempre se desenvolvem no mesmo sentido do vento (McKEE, 1979).

As dunas barcanas formam-se sobre a superfície praial (pós-praia) e, gradativamente vão sendo deslocadas para o interior dos campos de dunas pela ação de ventos unidirecionais (NE), aumentando suas dimensões com o sucessivo acúmulo de areia proveniente da forma em lençol, podendo formar cadeias de barcanas de pequeno porte, o número desse tipo de duna é significativamente maior no período de estiagem com maior incidência de ventos, obedecendo, portanto, ao controle climático. (GONÇALVES *et al.*, 2003) (Figura 4).

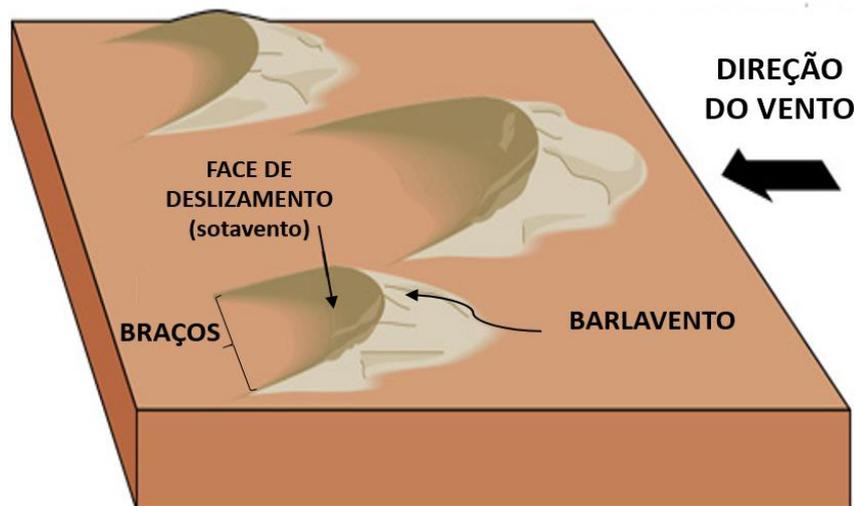


Figura 3: Disposição de uma duna barcana e seus principais elementos.
Fonte: Adaptado de EPgeology (2014)

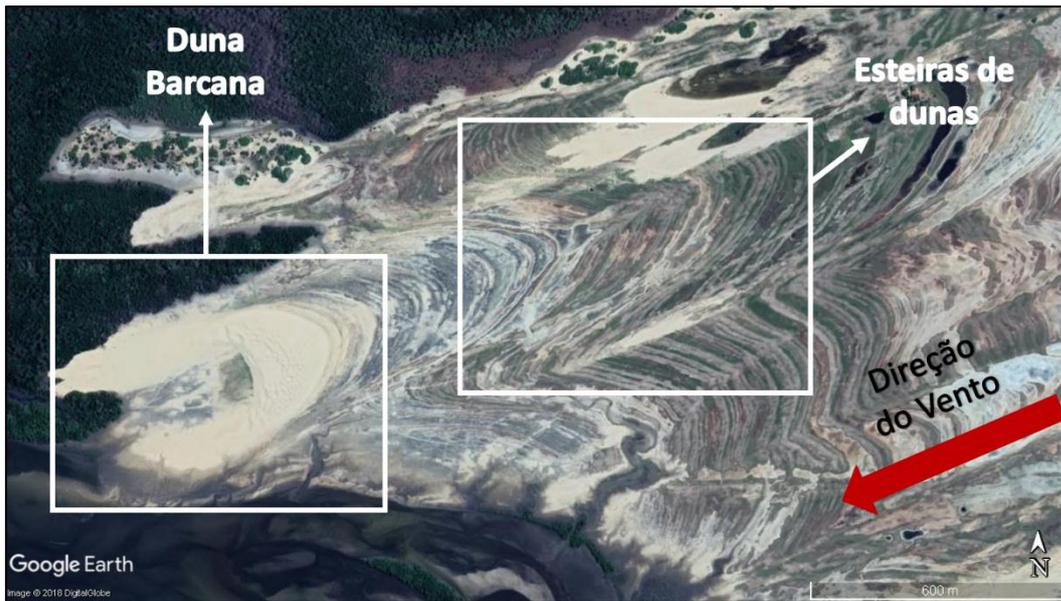


Figura 4: Imagem de duna barcana isolada com a presença de esteiras de dunas evidenciando sua migração, presentes na parte oeste do campo de dunas da área de trabalho.

Fonte: Google Earth (2018), adaptado.

Esteiras de dunas

As esteiras de dunas são arcos parabólicos definidos na superfície do terreno por semelhantes ressaltos aos contornos de barlavento (FORTES, 1992). Segundo Gonçalves *et al.* (2003) essas feições são formadas quando da migração das dunas obedecem rigorosamente a um controle sazonal, no caso do litoral do Maranhão, durante os meses de janeiro a junho, tem-se a estação chuvosa, quando ocorre a elevação do lençol freático e consequente a fixação das dunas; no período de estiagem, julho a dezembro, ocorre o rebaixamento do lençol freático e as dunas migram. Esse regime anual deixa registrado as esteiras das dunas, formadas não somente pelos ressaltos como, também, por cristas e cavas ou baixios associados. Uma análise de imagens de satélite de alta resolução ou foto aéreas podem informar sobre o intervalo de tempo de migração das dunas apenas analisando esses elementos. (Figura 4.)

Dunas transversais de crista reta (2D)

Correspondem às dunas de maior altura de crista e menor taxa de deslocamento anual (Figura 5). Gonçalves *et al.* (2003) afirma que o contato frontal e lateral com a vegetação e pequenas drenagens retarda seus avanços e,

consequentemente, tem-se a redução da distância interdunar e, também, certa retilinização das cristas. Assim, no caso em estudo, este processo passa a ser determinante na transformação de dunas transversais 3D em 2D, a altura dessas dunas reflete seu cavalgamento sobre outras dunas (Figura 6).

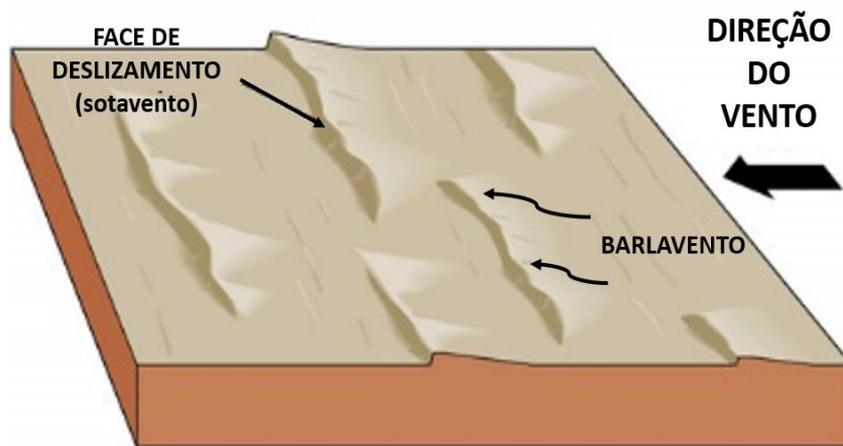


Figura 5: Disposição de dunas transversais de crista reta (2D) e seus principais elementos.

Fonte: Adaptado de EPgeology (2014)



Figura 6: Dunas transversais em movimento de cavalgamento sobre o campo de dunas parabólicas fixas pela vegetação, localizadas no campo de dunas da área de trabalho.

Fonte: Google Earth (2018), adaptado.

Cordões longitudinais

Os cordões longitudinais são feições desenvolvidas nas porções laterais de dunas barcanas e de transversais durante suas migrações. Branco *et al.* (2003) afirma que esse tipo de feição acontece em grupo, que caracteriza-se por corpos alongados com cristas suavemente onduladas, com dezenas de metros de extensão. Nesse caso, dunas barcanas são transformadas em dunas parabólicas ao cruzarem áreas rebaixadas com maior umidade que as adjacentes.

Segundo Branco *et al.* (2003) e Gonçalves *et al.* (2003) o índice de cobertura vegetal permite uma lenta migração do corpo dunar, muitas vezes dificultada pelo encontro com dunas inativas e/ou corpos d'água, à medida que a migração tem prosseguimento, um dos braços passa a migrar mais rapidamente do que o outro gerando a transformação de uma feição parabólica em cordão longitudinal (Figura 7).



Figura 7: Cordões longitudinais formados por transformações de dunas, barcanas e transversais.

Fonte: Google Earth (2018)

Dunas Parabólicas

Para McKEE (1979) as dunas Parabólicas fazem parte de um conjunto de dunas controladas, aparentemente, mais pela presença de vegetação e umidade do que pela força e direção do vento. Possuem o formato em “parabólica” e

possuem a face barlavento em forma de “v” ou “u” sendo que seus braços (cauda) aprisionados pela vegetação ou umidade e, seu nariz à extremidade que migra segundo o sentido do vento. (PYE e TSOAR, 1990) (Figura 8). Os rastros de sedimentos, geralmente denominados de alças arenosas, são representados por braços simétricos ou assimétricos em sentido oposto ao vento (Figura 9). Conforme Gonçalves *et al.* (2003) a duna parabólica possui sua face de deslizamento mergulhando em mais de uma direção, dependendo para isso da disponibilidade de partes de suas bordas estarem livres para migrar das dunas.

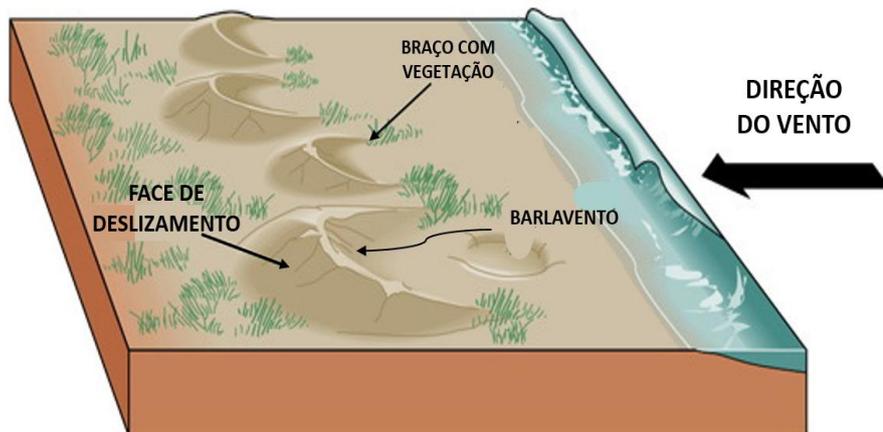


Figura 8: Elementos de dunas parabólicas.
Fonte: Adaptado de EPgeology (2014)



Figura 9: Duna parabólica com pouca disposição de vegetação em seus braços (caudas), presente na sede do município de Tutóia.
Fonte: Google Earth (2018), adaptado.

3.2. Geoprocessamento

O responsável pela introdução do geoprocessamento no Brasil, Xavier-da-Silva e Zaidan (2004) ressalta que o geoprocessamento “destina-se a tratar os problemas ambientais levando em conta a localização, a extensão e as relações espaciais dos fenômenos analisados, visando contribuir para a sua presente explicação e para o acompanhamento de sua evolução passada e futura”.

Para Camara (1996) o termo Geoprocessamento denota a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica. O autor ainda afirma que esta tecnologia, influência de maneira crescente principalmente nas áreas de Cartografia, Análise de Recursos Naturais e Planejamento Urbano e Regional.

Em uma recente definição, o Geoprocessamento é considerado uma “tecnologia, ou mesmo um conjunto de tecnologias, que possibilita à manipulação, a análise, a simulação de modelagens e a visualização de dados georreferenciados” (FITZ, 2008, pág. 24).

Em uma abordagem mais ampla Girard (2009) afirma que o Geoprocessamento e suas técnicas podem ser utilizadas como instrumentos fundamentais para construção de análises e discursos críticos, acerca das dinâmicas espaciais e realidades sociais, na medida em que o emprego de tais técnicas cartográficas nos permite espacializar precisamente as informações e sobrepor séries de dados espaciais, possibilitando a construção de análises.

O desenvolvimento e inovações nas tecnologias de Geoprocessamento, por permitir a armazenagem e a combinação de elementos espaciais bem como fornecer ferramentas computacionais para que os diferentes analistas determinem as evoluções espacial e temporal de um fenômeno geográfico e as inter-relações entre diferentes fenômenos, tem significado um avanço, contribuição e enriquecimento em vários campos de pesquisa. (CAMARA, 1996; FITZ, 2008)

Dessa forma, o emprego de geotecnologias permite estudo mais abrangente e processamento de informações com maior rapidez, como Sensoriamento Remoto (SR) e Sistema de Informações Geográficas (SIG), o que possibilita adaptar e aprimorar os levantamentos em geociências. (HOFF *et al.* 2010)

Dentre as principais tecnologias envolvidas no Geoprocessamento, a **cartografia digital** pode ser entendida como sendo a tecnologia destinada a captação, organização e desenho de mapas. O **processamento digital de**

imagens pode ser entendido como sendo o conjunto de procedimentos e técnicas destinadas a manipulação numérica de imagens digitais cuja a finalidade é corrigir distorções das mesmas e melhorar o poder de discriminação dos alvos, enquanto que os **sistemas de informação geográfica** são sistemas destinados à aquisição, armazenamento, manipulação, análise e apresentação de dados referenciados espacialmente (ROSA, 2013)

3.2.1. Sistemas de Informação Geográfica (SIG)

As atividades que envolvem o geoprocessamento são desenvolvidas por sistemas específicos, identificados como *Sistemas de Informação Geográfica* (SIG) configurados em softwares capazes de reunir e vincular objetos gráficos a estruturas de banco de dados, permitindo a realização de complexas análises espaciais. (Da SILVA, 2014)

Os primeiros SIGs, baseados na utilização de computadores e técnicas de georreferenciamento das informações em bases territoriais, surgiram na década de 60, no Canadá, como parte de um programa governamental para criar um inventário de recursos naturais, no entanto, eram muito difíceis de serem usados, excessivamente caros, e na época, não existiam soluções comerciais prontas para uso, e cada interessado precisava desenvolver seus próprios aplicativos, o que demandava muito tempo e muito dinheiro. (CAMARA e DAVIS, 2001; ROSA, 2013)

Nos anos 1970 surgiu então a expressão *Geographic Information System* (GIS ou SIG), devido ao aprimoramento do hardware, mas seu uso ainda era restrito às grandes organizações devido aos custos (ROSA, 2013). Na década de 1980 os sistemas de informação geográfica iniciaram um período de acelerado crescimento se beneficiando dos avanços proporcionados pela microinformática, de acordo com Goodchild (1991). Atualmente, o SIG faz parte do ambiente WEB, os aplicativos são simples e de fácil manuseio, pessoas que até então não tinham qualquer contato com ferramentas GIS, passam de uma hora para outra a ter acesso à qualquer parte do planeta por meio de aplicações que misturam imagens de satélite, modelos 3D e GPS. Várias definições para SIG foram elaboradas desde o seu surgimento, buscando englobar tanto os aspectos metodológicos quanto conceituais relativos à realidade ambiental. Dentre eles podemos citar a definição de Marble (1984) que afirma que SIGs são “sistemas voltados à aquisição, análise, armazenamento, manipulação e apresentação de informações referenciadas espacialmente”.

Burrough, (1986) define como “Conjunto poderoso de ferramentas para coletar, armazenar, recuperar, transformar e visualizar dados sobre o mundo real”. Para Aronoff, (1989), SIG é considerado “Um conjunto manual ou computacional de procedimentos utilizados para armazenar e manipular dados georreferenciados”. Enquanto que para Cowen (1988) pode ser definido como “Um sistema de suporte à decisão que integra dados referenciados espacialmente num ambiente de respostas a problemas”.

Em uma abordagem mais atualizada, Rosa (2013) afirma que “um SIG pode ser definido como um sistema destinado à aquisição, armazenamento, manipulação, análise, simulação, modelagem e apresentação de dados referidos espacialmente na superfície terrestre, integrando diversas tecnologias.

O objetivo geral de um SIG é servir de instrumento eficiente para todas as áreas do conhecimento que fazem uso de mapas, possibilitando integrar em uma única base de dados informações representando vários aspectos do estudo de uma região; permitir a entrada de dados de diversas formas e combinar dados de diferentes fontes, gerando novos tipos de informações. (ROSA,2013)

Baseado em conceitos de Aronoff (1989), Burrough (1986), Cowen (1988) e Smith *et al.* (1987), Camara (1996) indica que as principais características de SIGs são:

- Inserir e integrar, numa única base de dados, informações espaciais provenientes de dados cartográficos, dados censitários e cadastro urbano e rural, imagens de satélite, redes e modelos numéricos de terreno;
- Oferecer mecanismos para combinar as várias informações, através de algoritmos de manipulação e análise, bem como para consultar, recuperar, visualizar e plotar o conteúdo da base de dados georreferenciados.

Os dados tratados em geoprocessamento têm como principal característica a diversidade de fontes geradoras e de formatos apresentados. Os dados estarão vinculados a dados espaciais através de arquivos digitais gráficos. Cabe às ferramentas e SIG realizar análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georreferenciados. Tornam ainda possível automatizar a produção de documentos cartográficos. (CAMARA, 1996; MARTINS, 2009)

Conforme aponta Martins (2009), os Sistemas de informações Geográficas estão estruturados em dois tipos de dados: os dados espaciais e os dados alfanuméricos. Os dados espaciais são considerados aqueles representados de forma gráfica (imagens, mapas temáticos ou planos de informações), a estrutura destes dados geográficos pode ser composta por planos de informação (overlay,

raster, níveis ou layers) os quais podem ser sobrepostos uns aos outros, constituindo, dessa forma, um modelo digital do ambiente (XAVIER da SILVA, ZAIDAN, 2004).

No contexto destas inovações, os Sistemas de Informações Geográficas têm desempenhado um papel importante como integrador de tecnologia. Conforme Camara e Davis (2001), sempre que o “onde” aparece, dentre as questões e problemas que precisam ser resolvidos por um sistema informatizado, haverá uma oportunidade para considerar a adoção de um SIG

O SIG atualmente pode ser considerado uma poderosa tecnologia porque permite aos geógrafos, e a outros profissionais, integrarem seus dados, onde é possível elaborar mapas, modelar, fazer buscas e analisar uma grande quantidade de dados, todos mantidos em um único banco de dados. (XAVIER DA SILVA e ZAIDAN, 2004; ROSA, 2013). Ainda de acordo com os referidos autores, esses sistemas permitem o trânsito entre localizações e atributos, em outras palavras, a recuperação da localização a partir de uma informação e vice-versa; monitorias através do levantamento das alterações ambientais ocorridas em uma determinada área em épocas distintas.

Em síntese, o uso da tecnologia de SGI's é vasto, podendo esta envolver diferentes aplicações, desde o extenso campo do planejamento territorial, como um todo, até os trabalhos em microescala, com destaque para os estudos de caso sobre definição de áreas de risco, potenciais e limitações, variabilidades e impactos ambientais, simulações, monitoramentos, zoneamentos entre outras aplicações de altíssimo interesse à tomada de decisões.

3.2.2.Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto pode ser definido, de uma maneira ampla, como sendo a tecnologia que permite a aquisição de informações sobre objetos ou fenômenos, através do uso de sensores, sem que haja contato direto entre os mesmos, essas informações são obtidas utilizando-se a radiação eletromagnética gerada por fontes naturais como o Sol e a Terra, ou por fontes artificiais como, por exemplo, o Radar. (NOVO, 1992; ROSA, 2013). O processamento digital de imagens é o responsável por manipular as imagens dos sensores ativos e passivos com o fim de “extrair” ou realçar na imagem o alvo foco do estudo (CRÓSTA, 1992).

As técnicas de sensoriamento remoto foram amplamente utilizadas durante a primeira e a segunda guerra mundial no planejamento de missões com fins

militares, mas somente em 1972, nos EUA, foi colocado em órbita o primeiro satélite de sensoriamento remoto com finalidade civil, destinado à obtenção de dados de forma rápida, confiável e repetitiva dos alvos terrestres. (ROSA, 2013)

Atualmente temos uma enorme variedade sistemas de obtenção de dados passivos ou ativos, orbitais ou sub-orbitais. As informações fornecidas por estes sensores nos permite conhecer melhor o nosso planeta, sendo ferramenta indispensável ao inventário, mapeamento e monitoramento dos recursos naturais.

A evolução do sensoriamento remoto, através de sensores mais potentes, proporcionando resoluções espectral, espacial, radiométrica e temporal cada vez melhores ampliando consideravelmente a sua aplicabilidade a diversas áreas do conhecimento. (CRÓSTA, 1992).

A respeito das classificações dos sistemas sensores utilizados na aquisição e registro de informações de alvos, Rosa (2013) afirma que estes podem ser classificados segundo:

A **resolução espacial**: Sensores imageadores, sistemas que fornecem uma imagem de um alvo. Sensores não-imageadores, os sistemas que fornecem informações sobre o alvo.

Segundo **a fonte de radiação**: Sensores ativos, quando têm uma fonte própria de radiação eletromagnética e Sensores passivos – são os que não possuem fonte própria de radiação

Segundo **o sistema de registro**: Sensores fotográficos, os que utilizam como fonte de registro um filme fotográfico. Sensores não-fotográficos, os que não utilizam como fonte de registro um filme. A exemplo deste último, temos os radiômetros, sensor ETM+/Landsat, sensor MSS/Landsat, sensor OLI/Lansat, CBERS, Ikonos, Quickbird; SPOT.

A aquisição desses dados e informações atualizadas, possibilita a identificação das entidades e eventos recentes, integrantes da realidade ambiental de uma determinada área. A principal vantagem do sensoriamento remoto realizado a partir das plataformas orbitais reside no fato de permitir uma visão sinóptica (de conjunto), obedecendo a uma determinada frequência de geração, o que possibilita tanto a aquisição de considerável quantidade de dados e/ou informações em curto espaço de tempo, quanto o monitoramento de extensas áreas da superfície terrestre, com forte resolução espacial. (XAVIER DA SILVA, ZAIDAN, 2004; MARTINS, 2009)

Por fim, a realização de trabalhos que utilizam fotografias aéreas ou imagens de satélite com fins de levantamentos, monitoramento ou mapeamento,

em qualquer que seja a área de conhecimento, devem ser seguidas etapas, como a definição dos objetivos, escolha da área de estudo, aquisição dos produtos, escolha da técnica de extração das informações (interpretação visual e ou classificação de imagens) e trabalho de campo para validação do mapeamento. (XAVIER DA SILVA, ZAIDAN, 2004; CAMARA, DAVIS, 2001; ROSA, 2013).

3.2.2.1. Aplicação do geoprocessamento em estudos no ambiente costeiro

O uso de geoprocessamento tem auxiliado muitos estudos com foco no mapeamento no monitoramento de ambientes costeiros com abordagem tanto na dinâmica da linha de costa, assim como da mobilidade de campos de dunas.

Como exemplo deste último, Ardon, Tsoar e Blumberg (2009) detectaram **mudanças de formato de dunas na cidade de Asdode em Israel** ao monitorara-las por imagens de satélite. Ao utilizar imagens de alta resolução com datação do inverno de 2004-2005 e monitoramento de cinco pontos, as principais mudanças relatadas foram mutação de dunas barcanas que se converteram em dunas parabólicas que tornaram –se fixas devido a mudanças no uso da terra. Os autores relataram ainda que o padrão e mudança dessas dunas parabólicas na área em questão é a evolução para dunas nebkhas, que são dunas fixas construídas através do acúmulo de areia em vegetações. Não houve diferenças significativas entre as taxas de erosão / deposição dos cinco pontos de estudo colocados em cada nebkha. Uma mudança na dinâmica das dunas foi observada pelo surgimento de arbustos na crista. Estes arbustos prenderam a areia e aumentaram a altura da crista, nesse caso, a duna se torna mais estreita, mais alta, com uma forma côncava, durante a transformação de um barcana para uma duna parabólica.

Mudanças significativas no uso e cobertura do solo podem estar ligadas às **mudanças de regiões costeiras e aumento, ou aparecimento, de dunas**. A exemplo de caso, Carretero *et al.* (2014) realizou uma análise multitemporal de imagens de satélite Landsat, dos anos de 1973, 1986, 2001 e 2010 e conseguiu distinguir quatro tipos de uso da terra e um aumento significativo de recarga de água no aquífero costeiro na província de Partido de La Costa (Buenos Aires, Argentina). Os autores conseguiram detectar mudanças significativas no uso da terra e junto aos cálculos de balanços hídricos, encontraram ligações entre o aumento das áreas urbana entre 1973 e 2010 o desenvolvimento de uma rede

urbana está associada à fixação de dunas na costa. A exposição do solo em áreas urbanizadas e o escoamento superficial, nesse caso, facilitou o aumento da carga de sedimentos que chegavam à costa, tornando a acumulação maior que a erosão promovendo aparecimento de feições eólicas.

No sul do estado da Califórnia nos Estados Unidos, Potter e Weiggand (2016) precisaram avaliar os riscos para a instalação de energia renovável e operações próximas às dunas ativas do deserto; para isso realizaram um estudo baseado em análise multitemporal de imagens Landsat no período de 1992-2010. Utilizando a composição de bandas RGB e a sobreposição de raster composta de vetores de ano a ano, o estudo permitiu **obter taxa de migração de feições eólicas, bem como as distâncias de migração das bordas dunas** de areia durante todo o período de monitoramento das imagens de satélite, taxa essa que serviu como método para caracterizar a mobilidade das dunas.

Como resultado os autores identificaram que entre 1995 e 2014, a região conhecida como **Palen Dunes** perdeu mais da metade de sua superfície estável de dunas e aumentou sua zona de acumulação de areia quase a mesma cobertura de área. Em contraste, as mudanças nos padrões de movimento de areia em **Kelso Dunes** não foram aparentes, talvez devido às suas características de paisagem montanhosa mais restritivas. Potter e Weiggand (2016) concluíram que estes resultados têm uma aplicação para entender o futuro transporte de areia e caracterizar os impactos potenciais para a energia solar em escala próxima.

No Brasil os estudos que usam como ferramenta o Geoprocessamento tem se tornado cada vez mais comuns, isso por conta da gama de possibilidades que apresenta.

No que se refere ao uso de geoprocessamento em análises de estudos costeiros, Marino e Freire (2013) chamam a atenção para a importância da elaboração de uma base multitemporal de imagens de satélite e fotografias aéreas, pois favorecem a identificação e compreensão da dinâmica natural e ambiental, sendo essenciais como subsídio às tomadas de decisões acerca do uso e gestão sustentável de regiões costeiras. Em seu trabalho, **Análise da evolução da linha de costa entre as Praias do Futuro e Porto das Dunas, Região Metropolitana de Fortaleza**, os autores realizaram o mapeamento sistemático da linha de costa e a partir da análise multitemporal de imagens de sensoriamento remoto e de fotografias aéreas associadas a técnicas de geoprocessamento.

Para tanto foi utilizado software ArcGIS 10.0 onde foram construídas linhas paralelas a linha de costa com base nas imagens de satélite georreferenciadas

entre os anos de 1972 e 2010, conseguindo calcular as taxas de avanço e recuo da linha de costa. Como resultado, a variabilidade da linha dessa área se mostrou bastante instável em sua totalidade, apresentando pontos com bastante erosão e outros com uma forte tendência progradantes. Os autores atribuíram essas mudanças ao crescimento urbano, onde a implantação das estruturas antrópicas gerou a desconfiguração morfológica e soterramento de alguns ecossistemas.

Mallmann *et al.* (2014) **realizaram a classificação morfodinâmica das praias arenosas de Ipojuca- PE**, através da análise semântica de imagens de satélite pancromáticas. Neste estudo a técnica classificação utilizada foi a visual, que exige do usuário um conhecimento de campo.

Foram adquiridas imagens de satélite gratuitas, tendo início com o levantamento das imagens disponíveis no Google Earth, analisadas em ambiente ArcGis 9.2 complementando as observações com dados sobre a declividade da pós-praia e granulometria da praia. O resultado foi a identificação de feições e características que permitissem distinguir os estados morfodinâmicos entre as praias do litoral pernambucano. No entanto, os autores atentam para a necessidade de se ter acesso a boas imagens e que os intérpretes sejam treinados e experientes.

Sejam por meio de interpretação visual de imagens, medições diretas em campo ou modelagem matemática, as metodologias aplicadas ao monitoramento de dunas ativas na perspectiva de examinar as tendências à migração ou estabilização, possui em comum a confiabilidade de gerar resultados que de fato existe uma migração ou não dos depósitos eólicos. (Claudino-Sales e Peulvast, 2001; Giannini *et al.* 2005; Hesp *et al.* 2005).

O trabalho de Branco *et al.* (2003) apresenta uma proposta de **Proposta de Classificação para as Feições Eólicas** do Setor Leste da Região Metropolitana de Fortaleza – CE, que foi gerada por meio de pesquisas de campo, interpretações de fotografias aéreas e imagens orbitais. As características com as formas, tamanho, índice de cobertura vegetal e posicionamento em relação à linha de costa foram obtidas por intermédio de interpretações de imagens de sensoriamento remoto, complementadas por informações de campo referentes aos aspectos sedimentológicos, estruturas sedimentares, processos pedológicos, número de superfícies de deslizamentos e suas relações com a direção preferencial dos ventos.

A interação entre as informações obtidas pela interpretação das fotografias aéreas e as extraídas das imagens dos satélites Landast-TM e

Ikonos-II permitiu verificar a natureza migratória das feições eólicas, assim como as alterações ambientais decorrentes da expansão urbana.

Andrade de Meireles, (2011) através do uso de imagens de satélite e com a utilização de ferramentas de geoprocessamento e cartografia digital, elaborou um **modelo de migração do campo de dunas barcanas e monitoramento da dinâmica morfológica da planície costeira** de Jericoacoara –CE. A migração das dunas foi definida através de recobrimentos aerofotogramétricos e imagens de satélite multitemporais, principalmente imagens Landsat (197-2010) combinada a uma imagem Quickbird de 2005. Para auxiliar na definição dos componentes morfológicos da planície foi utilizada imagem de radar SRTM obtida em 2005. Os dados de imagens passaram por técnicas de processamento digital de imagens (PDI), produzindo os primeiros elementos da base de dados, tais como pré-processamento, processamento de cores, realçamento de contraste, manipulações espectrais e classificação.

Como resultado, a planície costeira de Jericoacoara foi caracterizada de acordo com os componentes morfológicos associados aos campos de dunas e ecossistema manguezal. A composição morfológica atual da planície e a dinâmica de migração das dunas móveis foram definidas através da vetorização das imagens de satélite dos anos de 1975 a 2010. Como resultado, Andrade de Meireles (2011) conseguiu determinar um deslocamento médio das dunas, bem como analisar os motivos do aumento de seu deslocamento, atribuído principalmente resultados de ações antrópicas.

No Maranhão, trabalhos como de Santos *et al.* (2005), e Araújo e da Fonseca (2016) baseados na análise multitemporal possibilitou comparar a mesma paisagem, no caso PNLM, entre dois ou mais períodos, auxiliando no monitoramento das suas dinâmicas.

O trabalho de Santos *et al.* (2005) apresentou um **Modelo Evolutivo do Campo de Dunas do Parque Nacional Dos Lençóis Maranhenses**, definindo, para a área de estudo, quatro sistemas encadeantes representados pelas: Zona de Alimentação, Zona de Entrada, Zona de Retenção e Zona de Saída. O resultado foi obtido a partir da interpretação das imagens de satélites LANDSAT - 7 (2002) e CBERS (2004), e fotografias aéreas de 1976 (1:70. 000) e 1999 (1:30.000), cruzando com análises granulométricas dos sedimentos através utilização de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento. A metodologia aplicada neste trabalho serviu de base para estudos posteriores do PNLM, como o trabalho de Santos (2008) que apresentou estudo baseado em verificações em campo juntamente com análise multitemporal, processamento e

comparação imagens de satélite e fotos aéreas, evidenciam claramente que o campo de duna ativo delimitando a progressão do mesmo.

Em seu estudo, Araújo e da Fonseca (2016) conseguiu **analisar a dinâmica de caráter espaço-temporal do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses**, mapeando as mudanças do sistema dunário a partir de imagens de satélite, no período de 1984 a 2014. A análise foi realizada a partir de imagens de satélite dos sensores TM-Landsat 5 e OLI-Landsat 8, a escolha foi por conta da disponibilidade histórica de imagens e seu baixo custo.

Como procedimento foram monitoradas as mudanças na cobertura do solo a partir da variação anual dos valores de reflectância da superfície na banda do infravermelho próximo, permitindo identificar o tipo de mudança quanto o tempo de ocorrência das mesmas. A partir disso a borda limite do parque, na parte interior do continente, foi vetorizada para o ano inicial e final da análise, gerando mapas com o deslocamento das dunas no período de 31 anos o que permitiu identificar as áreas de avanço e retração do sistema dunário, os autores optaram por calcular a área total de avanço das dunas baseado na área dos polígonos resultantes e chegaram no valor de avanço de 23,69 km² e a retração 14,95 km². O estudo da dinâmica em questão ainda possibilitou identificar que expansão das dunas do litoral em direção ao interior do continente segue no sentido nordeste - sudoeste, seguindo a circulação dos ventos alísios.

4. Área de Estudo

4.1. Localização

A costa maranhense apresenta características diversificadas e largura variável, estendendo-se por 640 km distribuídos entre a foz do rio Gurupi e a foz do rio Parnaíba. Apresenta 5 segmentos diferenciados definidos pela Zona Costeira do Estado do Maranhão (ZCEM - Figura 10) composta por Costa Oriental (reentrâncias maranhenses), Costa Ocidental (dunas e restingas), Golfão Maranhense (baías), Baixada maranhense (terras baixas, planas e inundáveis) e Parque Estadual Marinho do Parcel Manuel Luís (região recifal coralina, quase totalmente submersa) com particulares características, em cada um deles (MARANHÃO, 2003). O Litoral Oriental do Estado do Maranhão, compreendido entre o Golfão Maranhense e a foz do rio Parnaíba (o rio marca o limite entre os estados do Maranhão e Piauí), encontramos uma paisagem marcada por uma linha de costa retilínea, recortando restingas, cordões de dunas fixas e móveis, manguezais, praias, baías, ilhas, enseadas e sistemas deltaicos que tem como característica principal, feições eólicas. (MUEHE, 2006; SOUZA, 2007).

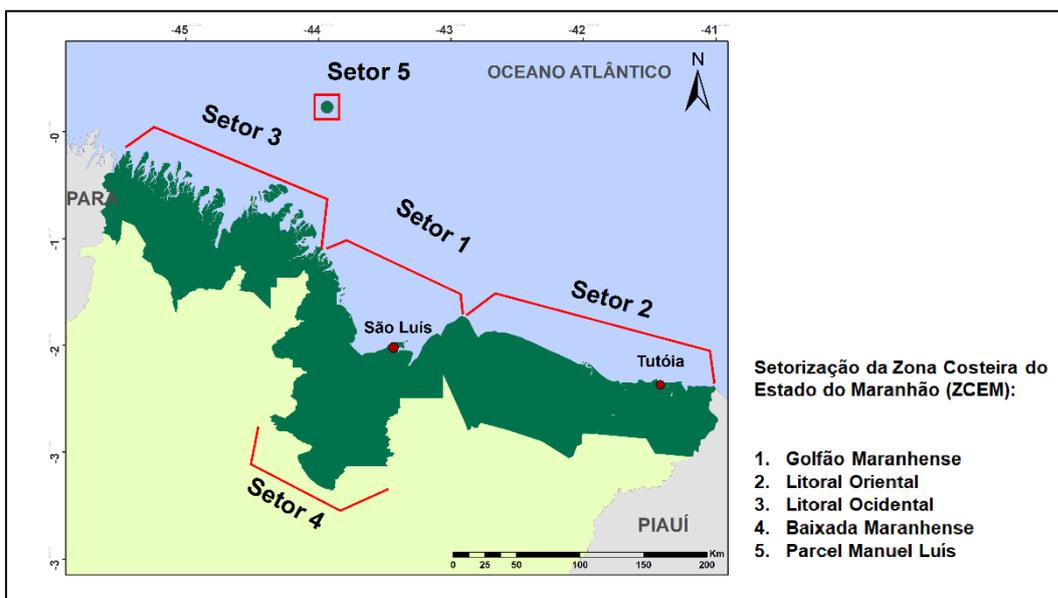


Figura 10: Mapa de Setorização da Zona Costeira do Estado do Maranhão (ZCEM)
Fonte: Adaptado de Ministério do Meio Ambiente - MA, 1996

O município de Tutóia (Figura 11) ocupa parte do extremo nordeste do Maranhão, possui área de 1.489,38 km² integrado à Área de Proteção Ambiental do Delta do Parnaíba que se caracteriza pela presença de campos de dunas móveis e lagoas formadas por água da chuva ou por elevação do lençol freático, onde é possível constatar, que a atividade dos agentes climáticos em vasto espaço exposto causa intensa evaporação e aceleração dos processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos superficiais (MMA/ZEE, 2002). Desta forma, a dinâmica da paisagem da área em estudo é dominada pela ocorrência destes processos de natureza física que tendem a se intensificar em decorrência das intervenções humanas.

Este tópico do trabalho traz uma primeira aproximação para maior conhecimento da dinâmica da área de estudo em questão, uma análise da ação dos agentes climáticos e oceanográficos, e dos processos geológico-geomorfológico na dinâmica da paisagem. Para isso foi priorizada uma pesquisa/revisão bibliográfica, constando de levantamento e análise de trabalhos relacionados com o tema e disponíveis sobre a área de estudo.

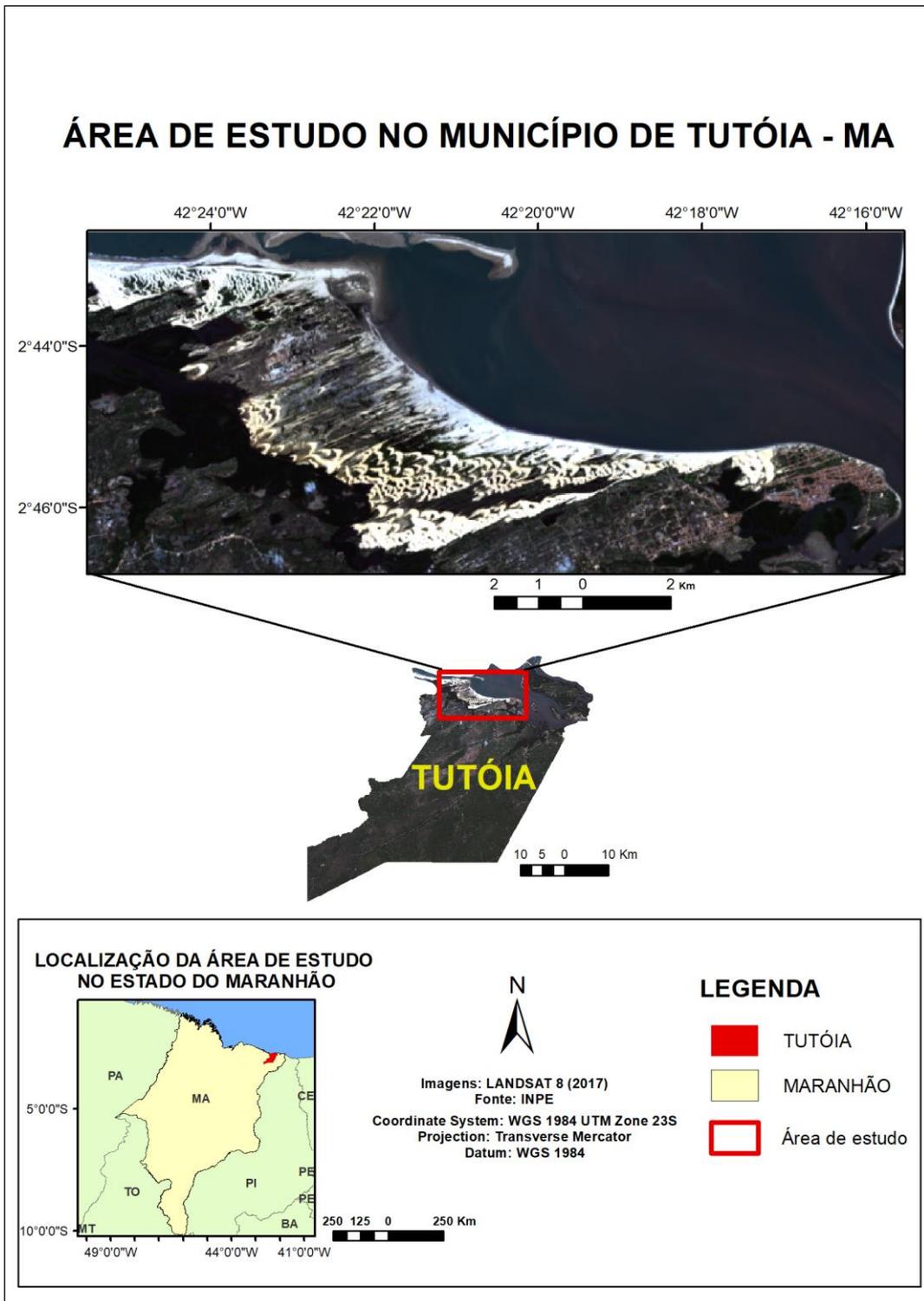


Figura 11:Localização da área de estudo no estado do Maranhão

4.2.Contexto do Plano diretor e APA do Delta do Parnaíba

O espaço geográfico sofre profundas modificações em virtude das derivações antropogênicas (diferentes graus de derivação dos sistemas naturais, sob o impacto humano) acarretando em mudanças muitas vezes irreversíveis. As dunas costeiras apresentam uma dinâmica específica regulada por fatores estruturantes e condicionantes à sua formação, sendo os últimos, elementos contribuintes ao processo de vulnerabilidade dunar que se associam tanto a fatores de caráter antrópico quanto relacionados à dinâmica costeira atuante no local.

Conforme Gonçalves *et al.*, (2005) e Santos (2008), a planície costeira que abrange o litoral oriental maranhense representa uma área receptora de sedimentos provenientes da deriva litorânea, “carreados ao longo da costa nordeste com substancial incremento na foz do rio Parnaíba, da plataforma interna (recoberta com areias, com a ocorrência de dunas subaquáticas) pelas ondas e da carga (arenosa) retrabalhada pelas drenagens locais”.

Ao longo dos anos pode ser observada a aceleração do acúmulo natural de sedimentos na zona costeira de Tutóia. Como resultado é notório o aparecimento de bancos de areia no mar, com conseqüente disponibilização desta areia para a praia e posterior remobilização pela ação eólica, o que favorece o avanço das dunas em direção às residências. A partir de entrevistas com os moradores locais, estes relataram que o avanço das dunas se intensificou nos últimos 20 anos, o que acarreta em diversos prejuízos, sendo o mais comum a perda dos imóveis e a constante mudança dos moradores (Figura 12).

São inúmeras as perdas que a comunidade vem enfrentando nas últimas décadas. Em pesquisa de campo e investigação junto a moradores mais antigos do bairro, realizada por esta pesquisa, foi possível constatar que além da mudança constante da costa associada a movimentação das dunas, ocorre também o avanço da linha de costa para o continente, o que evidencia um quadro de erosão principalmente na Praia do Amor e Praia da Barra (Figura 13).

A área de estudo em questão, que são os bairros mais afetados pela dinâmica dunar, localizam-se na faixa norte do litoral de Tutóia próximo ao centro da cidade. Os moradores ocuparam a área de modo a aproveitarem os recursos naturais disponíveis no local, principalmente a pesca artesanal, e segundo relatos de moradores mais antigos, a área começou a ser povoada aproximadamente há cem anos, com a chegada de retirantes das secas

nordestinas e pessoas vindas do interior do município, formando a comunidade de pescadores.



Figura 12: Avanço das dunas em direção às residências no bairro São José, localizado na praia da Barra.



Figura 13: Calçamento danificado por conta da erosão na Praia da Barra.

A maioria dos moradores recentes são agricultores vindos do interior do município, principalmente na década de 1970, com perspectiva de melhoria de vida. O crescimento e a ocupação desordenada, sem nenhuma forma de planejamento urbano, agravam os problemas sociais e ambientais vivenciados pelo município.

Os bairros visitados (Figura14), Cajueiro, São José, Aeroporto se encontram na sede municipal e integram, de acordo com o Plano Diretor (Tutóia, 2006, p.04), o 8º Polo de planejamento de desenvolvimento a curto e médio prazo. Dentre os Fatores Restritivos ao Desenvolvimento são abordados no Capítulo III, Art. 9º três pontos de interesse na abordagem deste trabalho:

§ 2º- VIII – a ocupação desordenada e irregular do solo;

XI – a ocupação inadequada de encostas de dunas, margens dos cursos d'água e áreas de mananciais;

XII – o excessivo adensamento populacional na região central da área urbana;

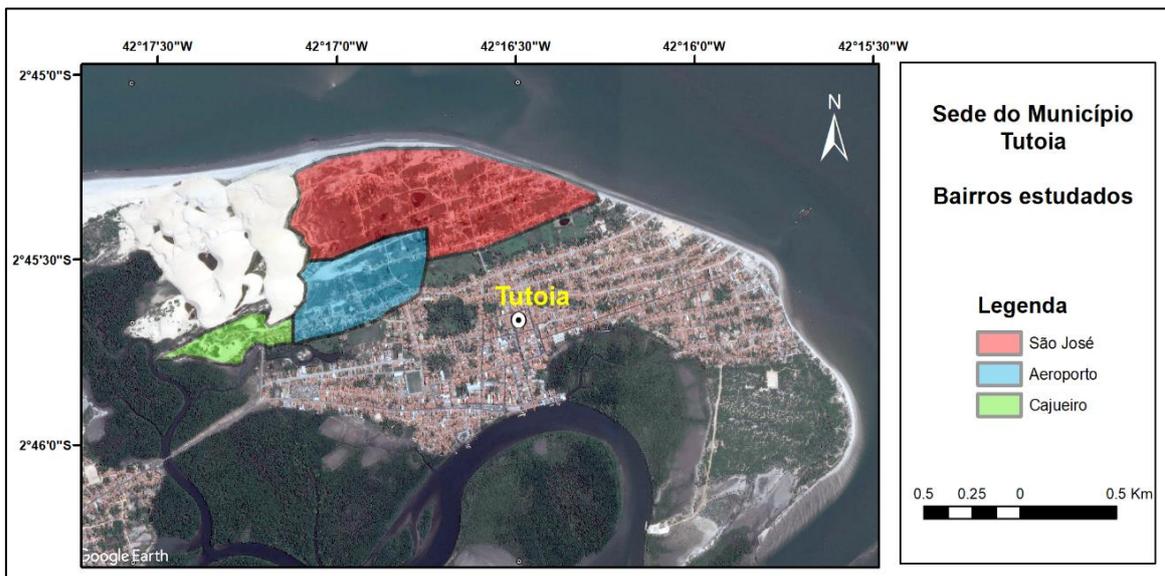


Figura 14: Bairros visitados na sede do município de Tutóia que constam citados no Plano Diretor como 8º Polo de planejamento de desenvolvimento a curto e médio prazo.

Dentre as Diretrizes Gerais da Política Urbana e as estratégias abordadas para sanar os problemas que constam no Plano Diretor, não se abordam medidas diretas para os problemas mencionados anteriormente. Algumas ruas foram beneficiadas com calçamento feito com blocos de cimento ou deposição de piçarra e barro colocado pela Prefeitura Municipal, para a melhor locomoção dos moradores até o centro da cidade, onde muitos trabalham e estudam.

A área de pesquisa ainda é carente no que diz respeito a serviços públicos como água tratada e saneamento básico além de energia de qualidade. Apesar de ter como planejamento Programas Habitacionais para preenchimento de vazios urbanos (Tutóia, 2006, p.39) programas como Minha Casa, Minha Vida, não incluíram os moradores da área mesmo fazendo o cadastro necessário. O Plano Diretor era para ser revisado em 2016, mas até o momento não foi organizado a comissão necessária.

Outro ponto a ser considerado é o fato da área de estudo, encontrar-se na Área de Proteção Ambiental Delta do Parnaíba (Figura 15), unidade de conservação administrada pelo IBAMA, criada pelo decreto S/n.º de 28.08.1996 por solicitação de ambientalistas, visando proteger o ecossistema costeiro formado por mangues e dunas localizados nos Estados do Maranhão e Piauí (MMA/ZEE, 2002).

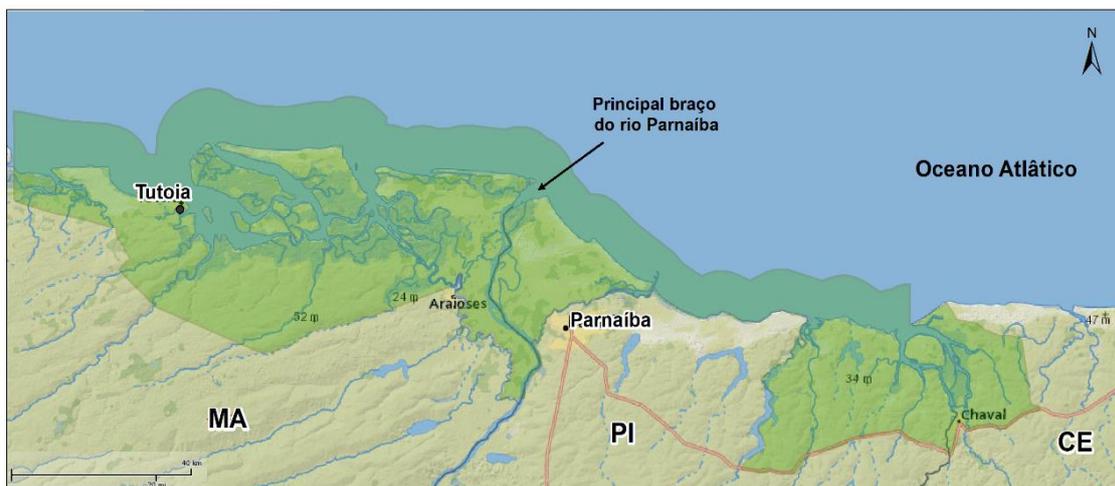


Figura 15: Localização da APA do Delta do Parnaíba em verde. Principal braço do rio Parnaíba é o limite entre os estados do Maranhão e Piauí.
Fonte: Adaptado de ICMBio/MMA

A APA do Delta do Parnaíba possui o Plano de Gestão e Diagnóstico Geoambiental e Socioeconômico, um documento que foi criado com o objetivo de fazer com que os moradores locais e o governo atuem conjuntamente no processo de gestão da área. Este Plano baseia-se ainda nas especificidades ambientais do local e nas aspirações de desenvolvimento da população, compatibilizando estes fatores de forma sustentada e incluindo instrumentos de gestão que envolva os aspectos sociais, culturais e ecológicos da área (LOUZEIRO e FEITOSA, 2016).

Neste Plano foi criada uma Matriz de Problematização, quadro onde foram elencados vinte e sete problemas onde são destacados os objetivos a serem alcançados e o Plano de Ação que elenca o grau de prioridade de cada uma.

Será destacado dentro dessa Matriz de Problematização (Tabela 2) três problemas que são abordados também no Plano Diretor, e seu respectivo Plano de Ação (Tabela 3) organizados no quadro a seguir.

Tabela 2: Matriz de Problematização da APA do Delta do Parnaíba.

Fonte: Adaptado (Decreto de criação da Área de Proteção Ambiental Delta do Parnaíba, 1996).

MATRIZ DE PROBLEMATIZAÇÃO VERSUS DEFINIÇÃO DAS AÇÕES		
PROBLEMAS	OBJETIVOS	AÇÃO PROPOSTA
Uso e ocupação desordenada da terra.	Regulamentação e ordenamento do uso e ocupação do solo	-Regulamentar, ordenar o uso e ocupação do solo; -Criar e implantar plano diretor para a área urbana.
Abastecimento e saneamento básico deficiente e/ou inexistente.	Abastecimento e saneamento básico, implantados e eficientes.	-Elaborar e implementar um programa de abastecimento e saneamento básico, compreendendo: rede de esgoto, aterro sanitário, rede de água tratada, reciclagem de lixo, matadouro municipal e incineração de lixo hospitalar.
Migração de dunas.	Migração de dunas controladas.	-Aplicar técnicas adequadas para controlar a migração das dunas.

Tabela 3: Plano de Ação da APA do Delta do Parnaíba.

Fonte: Adaptado (Decreto de criação da Área de Proteção Ambiental Delta do Parnaíba, 1996)

PLANO DE AÇÃO			
AÇÕES	PRIORIDADE	RESPONSÁVEIS E COLABORADORES	RESULTADOS ESPERADOS
Regulamentar, ordenar e controlar o uso e ocupação da terra.	19	Secretarias Municipais; ONG's; Universidades; INCRA	Redução do uso indevido do solo.
Elaborar e implementar um programa de abastecimento de água e saneamento básico	3	Secretaria Estadual de Recursos Hídricos; Companhia Estaduais de Águas, Esgotos e saneamentos; Secretarias Estaduais de Obras; Secretarias Estaduais de Saúde	Implantação de obras de saneamento básico urbano e rural
Aplicar técnicas adequadas para controlar a migração de dunas	26	IBAMA; Prefeituras Municipais; Secretarias Estaduais de Meio Ambiente	Controle da migração de dunas.

Para que uma APA tenha seus recursos naturais garantidos são necessários instrumentos de gestão com o objetivo de alcançar a efetividade do equilíbrio ecológico neste ambiente. Neste sentido, cabe ressaltar os instrumentos necessários para este fim, os quais são Zoneamento Ambiental, Plano de Manejo; Monitoramento, Avaliação e Fiscalização Ambiental e a Educação Ambiental e Gestão Participativa e Plano de Gestão, onde nesta pesquisa enfatiza-se este último na APA do Delta do Parnaíba e sua efetividade no município de Tutóia.

Observando os quadros pode-se afirmar que poucos desses problemas foram solucionados. Segundo Soavinsk (1998) uma das questões debatidas no momento da criação do Plano de Ação foi a necessidade de se realizar o seu zoneamento ambiental, como forma de viabilizar a administração de modo eficaz, com o manejo adequado dos recursos naturais e o atendimento das demandas socioambientais mais importantes para a região.

Outra ação que ainda não teve seus objetivos alcançados, principalmente para os moradores dos povoados existentes dentro da APA no município de Tutóia, é a falta de saneamento básico no município. Uma grande porcentagem das famílias depende de um sistema de abastecimento de água e saneamento básico insuficientes para uma qualidade de vida aceitável.

O município de Tutóia vem sofrendo grandes alterações ambientais devido às atividades de comércio, construção de casas e asfaltamento de estradas, tais ações são responsáveis pela retirada da cobertura vegetal, aumento do número de vias de acesso e diminuição de mangues nas margens dos corpos hídricos (LOUZEIRO e FEITOSA, 2016). Pode-se afirmar que tais problemas estão relacionados a falta de planejamento e fiscalização adequados na área, o que implica a intensificação das áreas urbanizadas em locais onde a proteção é mais acentuada, como por exemplo as margens de rios, poluição dos recursos hídricos, supressão da cobertura vegetal, etc.

Nesse contexto, o que pode ser notado é a ausência de um adequado planejamento ambiental para subsidiar cada município quem compõe a APA, especialmente os do Estado do Maranhão, pois é perceptível o não cumprimento dos objetivos propostos pelo Plano de Gestão. Outro fator que dificulta ainda mais a proteção do local é a falta de conhecimento da população de que moram em uma área protegida, os quais, se tivessem o mínimo de treinamento básico, serviriam como agentes fiscalizadores da área. Além disso, a ausência do Plano de Manejo e do Zoneamento Ambiental da Unidade atenuam ainda mais a ineficácia do seu gerenciamento.

4.3. Geologia e Geomorfologia

O quadro Geológico-Geomorfológico do Brasil é um reflexo das flutuações climáticas no decorrer do Cenozóico, alternando climas secos e úmidos. No Cretáceo Superior, a plataforma cearense foi inundada, invertida e tectonizada, servindo para a extensão irregular de coberturas marinhas. Mesma época que a fachada atlântica do Nordeste Brasileiro recebeu um complicado sistema de falhamentos e flexuras, responsável pelas fossas tectônicas de uma geração que permeia toda a plataforma continental e parte da retroterra costeira (AB'SABER, 1998).

Considerando que o Cretáceo é um período geológico importante devido às transformações ocorridas durante a formação do Oceano Atlântico, podemos afirmar que, a Bacia de Barreirinhas é de particular interesse visto que a sua formação está diretamente ligada à abertura do Atlântico Equatorial durante o NeoCretáceo (CORRÊA, 1986).

O município de Tutóia integra o bloco sedimentar da Bacia de Barreirinhas, esta, segundo Viegas Júnior (2000) e Trosdorf Junior *et al.* (2007), localiza-se na Margem Equatorial Brasileira, tanto em terra quanto no mar, aproximadamente entre os meridianos 44° e 42°O e os paralelos de 0° e 3°S, na região norte do Brasil, entre as cidades de São Luís (MA) e Parnaíba (PI), limitando-se ao sul com a bacia sedimentar do Parnaíba, separada pelo Arco Ferrer-Urbano Santos; ao norte pelo Oceano Atlântico; a oeste com a bacia de São Luís delimitada pelo Alto das Canárias e a leste com a Fossa do Piauí-Camocim. (Figura 16)

Na Bacia de Barreirinhas teriam se acumulado 10.000m de sedimentos, dos quais 8.000m pertencem ao Mesozoico (Cretáceo Inferior a Superior) e o restante ao Cenozoico, como exposto por Viegas Júnior (2000). O Arco Férrer-Urbano Santos constitui uma das principais estruturas tectônicas regionais da área, correspondendo a um alto estrutural de base cristalina, limitando as bacias de Barreirinhas-São Luís e Barreirinhas-Maranhão (GONÇALVES, 1997; SANTOS, 2008). Geologicamente, a bacia sedimentar Cretácea de Barreirinhas, conta com a presença de duas unidades estratigráficas bem definidas: a formação Barreiras e os Depósitos Aluvionares.

Na região do Delta do Parnaíba o litoral é sub-retilínea, com formações dunárias, praias arenosas e baías, onde prevalecem sedimentos detríticos da Formação Barreira e rampas arenosas que convergem para os fundos de vales. (MMA/ZEE, 2002; MARANHÃO, 2003). O quadro estrutural da área apresenta

formações superficiais predominantemente arenosas e em alguns trechos da praia é possível verificar a presença de material argiloso proveniente do mangue que se localiza nos canais do Delta do Parnaíba. Os depósitos quartzosos litorâneos marinhos e eólicos estão presentes por toda a extensão da costa, são preenchidos por sedimentos compostos por areias quartzosas finas e muito finas, modeladas pela ação eólica.

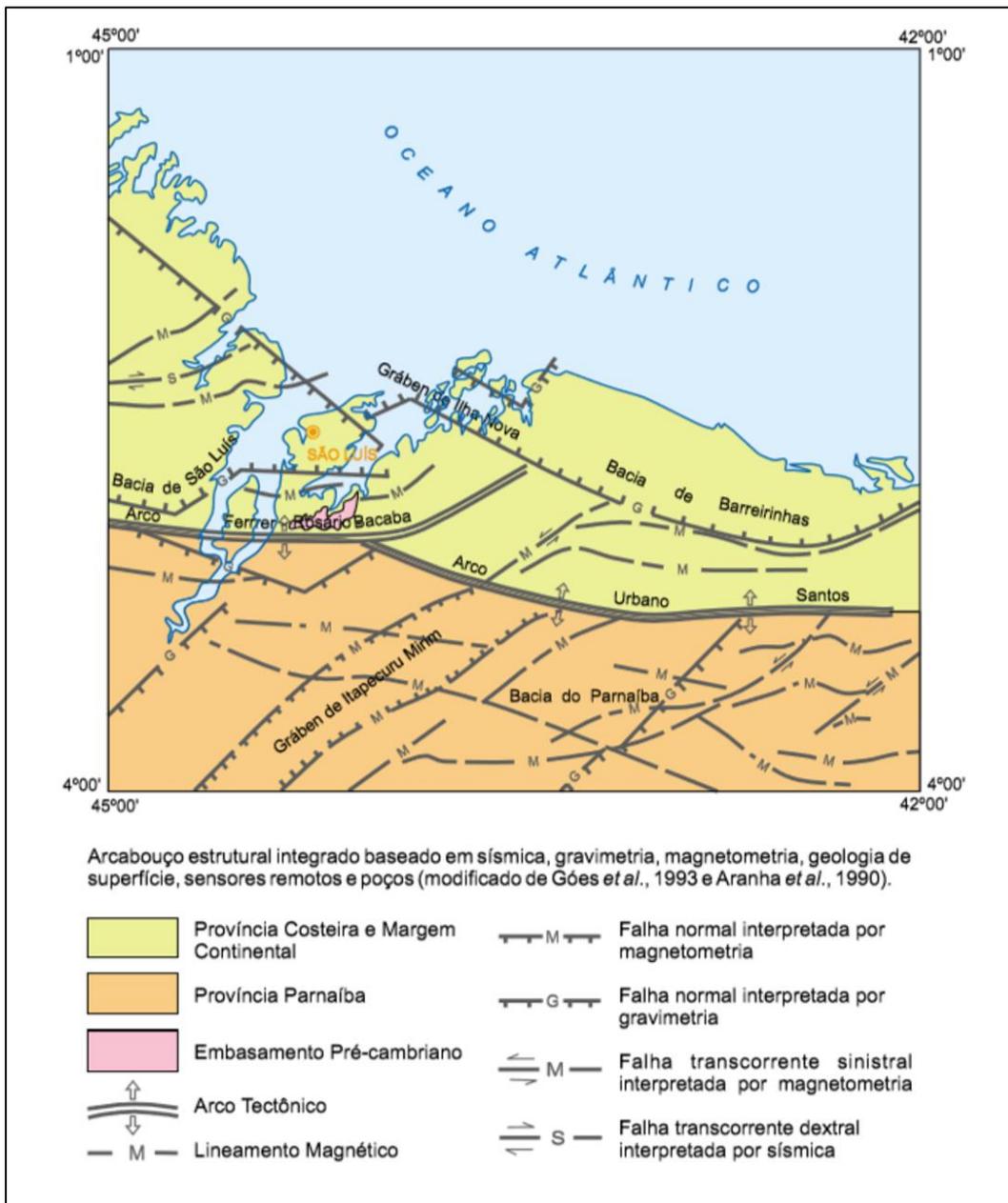


Figura 16: Arcabouço Estrutural da Bacia de Barreirinhas.

Fonte: Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil (VEIGA JÚNIOR, 2000).

Segundo Maranhão (2003) a Planície Costeira representa uma extensão ampla e ocorre desde as planícies de maré até os cordões duna-praia

dominadas pelos processos oceanográficos. Em todo o município de Tutóia, por se inserir na Planície Costeira Maranhense o relevo é baixo, apresentando algumas áreas com pequenas elevações caracterizadas por dunas e tabuleiros. A área litorânea sofre grande influência do Delta do Rio Parnaíba, sendo que uma das desembocaduras forma a baía de Tutóia, com grande quantidade de ilhas dentre as quais se destacam: Cajú, Melancieira, Igoronhon e Coroatá.

A Bacia de Barreirinhas corresponde a um graben (CORRÊA,1986), que é uma estrutura de falhas gravitacionais com um bloco central abatido, possuindo três grandes grupos de rochas: Canárias, Caju e Humberto Campos. Em análise aos trabalhos de Feijó (1994) e Trosdorf Junior *et al.*(2007), e a área de trabalho litoestratigraficamente corresponde aos grupos Canárias e Caju, o primeiro é formado por folhelhos cinza-escuros da Formação Arpoador, os arenitos grossos cinzentos da Formação Bom Gosto, os folhelhos cinza-escuros da Formação Tutóia e os arenitos médios cinzentos da Formação Barro Duro. O Grupo Canárias representa leques deltaicos depositados em ambiente marinho, principalmente a Formação Tutóia que tem deposição pró-deltaica (Figura 17).

A Formação Pirabas, formada por conglomerados, arenito continental e marinho, folhelhos e calcários marinhos, que se desenvolve por toda a bacia, capeando os sedimentos Cretáceos apesar de não aflorar por toda área da bacia. Formados por sedimentos depositados em ambiente fluvial, litorâneo e principalmente eólico, constituídos pelas areias quartzosas, recobrem praticamente toda a bacia de Barreirinhas. (GONÇALVES, 1997).

Veiga Júnior (2000) e Santos (2008) caracterizam geologicamente as coberturas quaternárias encontradas nos Lençóis Maranhenses são subdivididas em: Depósitos de Cordões Litorâneos; Depósitos de Mangues, Depósitos Marinhos Litorâneos, Depósitos Eólicos Litorâneos, Depósitos Fluviomarinhos, Aluvionares e Coluvionares (Figura 17)

As formas de relevo litorâneas podem resultar tanto da ação erosiva como da deposição, que caracterizam as costas escarpadas e as costas baixas ou planas. São resultados de intenso trabalho em virtude dos movimentos relativos do nível das terras e das águas principalmente no decorrer do Plioceno e Quaternário. (CHRISTOFOLETTI, 1980).

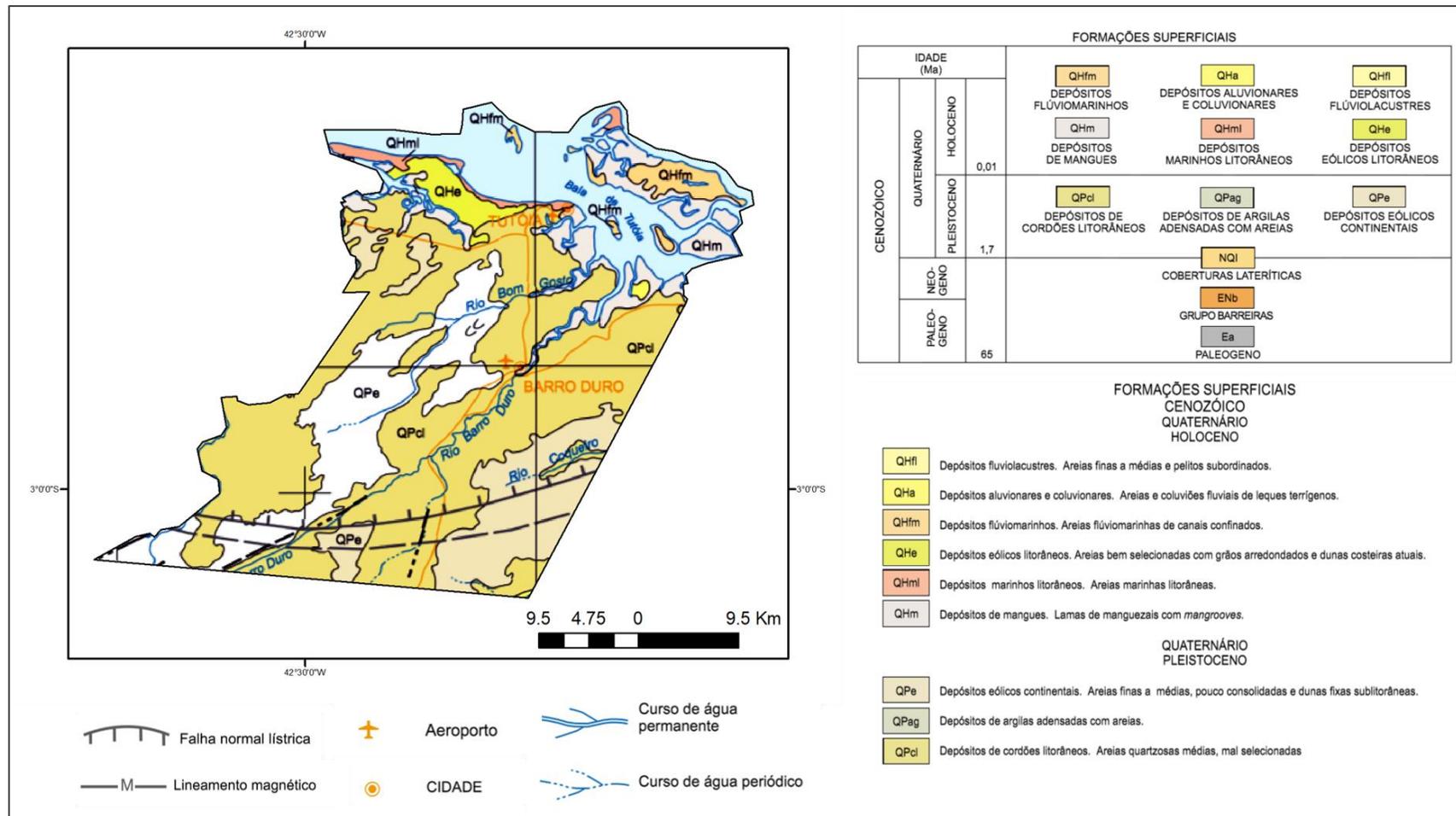


Figura 17: Recorte da Carta Geológica da Bacia de Barreirinhas: Recorte da Carta Geológica da Bacia de Barreirinhas.

Fonte: Adaptado de Programa de Levantamento Geológicos do Brasil, (VEIGA JÚNIOR, 2000)

4.3.1. Morfodinâmica eólica dos sedimentos quaternários.

A paisagem costeira é resultante da morfogênese marinha, zona de contato entre as terras e os mares. Torna-se muito complexa por conta da interferência de processos marinhos e subaéreos sobre estruturas e litologias muito variadas, onde diversos processos e agentes interagem sobre ela, caracterizando um ambiente altamente dinâmico. (CHRISTOFOLETTI, 1981).

As praias são formadas por sedimentos arenosos, inconsolidados e depositados; as modificações ocasionadas nestes ambientes são resultado dos processos costeiros, estes determinam a natureza e a evolução da área costeira e constituem em uma variedade de parâmetros, incluindo o clima das ondas, marés, correntes, comportamento morfodinâmico, variação espacial do volume de sedimentos transportados e comportamento climático. (CHRISTOFOLETTI, 1980; PAULA, 2013)

Short (2016) ao se referir às praias brasileiras afirma que a costa norte a nordeste do país está exposta aos eventos climáticos do leste, que chegam ao nordeste com fortes ventos no inverno gerando ondas a 2 m, e que conduzem transporte substancial de sedimentos terrestres a oeste, construindo numerosos e extensos campos de dunas transgressivas de tendência a oeste.

Segundo Pereira *et al.* (2016) na costa oriental do Maranhão as marés diminuem para o leste de 7 m a 3 m, onde transgressões do Holoceno e do Pleistoceno, que se estendem por dezenas de quilômetros no interior, favoreceram o aporte de extensos depósitos marinhos e pleistocenos marinhos e eólicos, ambos sobre a cobertura e sobreposição da Formação Barreiras encontradas na região mais alta da Bacia do Rio Parnaíba.

Os sedimentos do Barreiras formam rampas suavemente inclinadas em um sistema de drenagem fluvial tabular. Os depósitos quaternários são representados por sistemas de praia, campos de dunas eólicas, depósitos fluviais, lacustres e estuários depositados ao longo da costa. (DOMINGUEZ, 2009; PAULA *et al.* 2016).

Short (2016) aplica a classificação de costa no Brasil elaborada com foco na variação nos sistemas de praia, projetada para fornecer uma visão geral nacional, que define as praias dominadas por ondas, Mista dominadas por maré-onda e dominadas por maré; juntamente com a forma e/ou comprimento da barreira dominante. Esta classificação foi baseada em estudos na Austrália que também apresenta marés que variam de micro para mega e ondas de baixo a

alto, juntamente com areia de praia que varia de fina a grossa, denominada de “Faixa de Maré Relativa”, ou *Relative Tide Range* (RTR) (Masselink e Short 1993). (Tabela 4)

Tabela 4: Sumário de um Esquema para Classificação Morfodinâmica das Praias incorporando os efeitos da maré.

Fonte: Modificado de Masselink & Short (1993).

Varição Relativa da Maré	Grupo	Tipo de Praia
RTR < 3	Dominado por onda	1. Refletiva 2. Barra 3. Dissipativa
3 < RTR < 15	Mista Maré - Onda	4. Terraço de Baixa Maré
3 RTR < 7		5. Barra/calha de Baixa Maré
3 RTR < 15		6. Ultra dissipativa
RTR > 15	Dominado por Maré	7. Transicional (Praia e Planície de Maré)

Quando as ondas são relativamente altas e as marés baixas e RTR <3 praias são dominadas por ondas. Entre 3 e 10 estão modificados por maré; e quando as ondas são muito baixas e a maré relativamente alta e RTR está entre ~ 10 e ~ 50 elas se tornam dominadas por maré.

A praia de Tutóia conta com energia de onda crescente, e de acordo com Pereira *et al.* (2016) pertence ao grupo “Dominada por Maré”, e se trata de praias compostas por areia fina e têm uma inclinação moderada, configurada por alta amplitude de maré e baixa altitude de ondas e avança de 100 a 200 metros de superfície arenosa durante um período de variação de maré. Esta singularidade, em relação às áreas afastadas das zonas de interação, permite que um volume maior de areia ingresse planície costeira adentro (Figura 18) (GONÇALVES; SANTOS; CASTRO, 2005).

Gonçalves, Santos e Castro (2005) ao se referirem a planície Costeira Oriental Maranhense evidenciaram que a característica da dinâmica costeira dominante exerce papel determinante nas características e distribuição dos depósitos eólicos ali presentes. As desembocaduras fluviais da região, denominados de “zonas de interação de agentes dinâmicos” por Gonçalves (1997), e que são os locais onde ocorre o encontro dos agentes dinâmicos representados pelas correntes de maré, fluvial, litorâneas e eólicas, resultando em extensas áreas de grande aporte de areia proveniente da carga dos rios, da deriva litorânea e também da plataforma continental gerando uma progradação localizada da linha de praia nas zonas de interação de agentes dinâmicos.

Em ambas as margens do Rio Parnaíba, na porção da planície entre os terraços eólicos e os sedimentos da Formação Barreiras, e conjunto de praias que antecedem o campo de dunas em direção ao continente, possui orientação leste-oeste e constitui o primeiro subsistema encontrado na direção norte-sul tornando-se a principal zona de alimentação de sedimentos mobilizados para formar as dunas (Figura 19). O depósito arenoso praial é formado principalmente pela ação das ondas, os ventos retiram parte desse material da praia transportando-os para o reverso do sistema onde são formadas as dunas (FLEXOR, 1993 e MARTIN *et al.*, 2005).

Muehe (2001) afirma que as dunas costeiras se formam em locais em que a velocidade do vento e a disponibilidade de areias finas são adequadas para o transporte eólico. Os sedimentos da praia situada no pontal arenoso exposto às ondas de mar aberto caracterizam-se pela presença de areia grossa na face de praia inferior e pela areia média e fina na face superior. A formação dos depósitos eólicos depende do transporte dos sedimentos existentes na praia, os quais são transportados em direção ao continente.



Figura 18: Configuração geral das praias de Tutóia, apresentado inclinação moderada, alta amplitude de maré e baixa altitude de ondas.



Figura 19: A praia de Tutóia, dominada por maré que antecede e forma o campo de dunas transgressivas, possui orientação leste-oeste.
Fonte: Google Earth (2018).

A dinâmica de transporte de sedimentos é controlada relativamente pelo clima local que dificulta o transporte eólico no período chuvoso e facilitando a movimentação das partículas no período de estiagem por conta da rápida evaporação. O fator climático tem papel importante na configuração da paisagem por controlar a intemperismo dos afloramentos rochosos, que sofrem ação de processos físicos, químicos e biológicos. Com ação dos processos as rochas são decompostas ou fragmentadas, repercutindo na qualidade e granulometria dos materiais a serem fornecidos ao remanejamento marinho.

As dunas costeiras representam um dos elementos da paisagem costeira com caráter dinâmico. Caracterizam ambientes construcionais, resultantes, principalmente, da conjugação dos agentes oceanográficos e climáticos, a qual pode ocorrer na franja costeira destituída ou não de vegetação, situam-se a sotavento de praias expostas a fortes ventos, com grande disponibilidade de areia junto às costas, passíveis de serem mobilizadas pelo processo eólico (SANTOS, 2008).

De acordo com Muehe (1998) e Santos (2008), a gênese do campo de dunas livres e fixas está intimamente relacionada à seleção dos sedimentos devido à retrogradação dos depósitos sedimentares da Formação Barreiras e

consequente alargamento da Plataforma Continental, devido às transgressões marinhas ocorridas desde o Pleistoceno, associadas ao aporte de sedimentos fluviais.

Os depósitos eólicos brasileiros são classificados como campos de dunas livres e dunas vegetadas. A área de estudo está incluída na classificação dos depósitos eólicos ativos brasileiros (SANTOS, 2008) e recebe influência direta da deposição deltaica do Parnaíba que se estende por uma zona costeira emersa de grande extensão.

Os principais campos de dunas costeiras segundo Giannini *et al.* (2005) são encontrados em quatro áreas: dos Lençóis Maranhenses ao extremo sul do Rio Grande do Norte; nas proximidades da desembocadura do rio São Francisco; na região de Cabo Frio no estado do Rio de Janeiro; e entre a ilha de Santa Catarina e o extremo sul do Rio Grande do Sul.

A área de estudo está representada pelo campo de dunas moveis onde a predominância é de dunas barcanóides e dunas transversais originadas pela transformação das cadeias barcanóides. O desenvolvimento das cadeias barcanóides por sua vez é resultante da união lateral de dunas barcanas. Quando há um maior fornecimento de areia estas podem se juntar formando sequências de cadeias onduladas alinhadas perpendicularmente à direção do vento (BRANCO *et al.*, 2003).

4.4.Aspectos Climáticos

A região nordeste do Brasil possui variação climática que se destaca em comparação às outras regiões do país, principalmente em relação às características da pluviosidade. Apresenta fatores importantes que influenciam na climatologia da região como o relevo constituído por amplas planícies e vales baixos situados entre planaltos e serras mais interiorizadas, bem como a conjugação de diferentes sistemas de circulação atmosférica que atuam na região.

Acerca dessa influência na mudança das formas de relevo, Feitosa (1989, p.11), afirma que: O clima compreende um conjunto de agentes morfogenéticos que atuam direta e indiretamente sobre a superfície terrestre, controlando o nível de intensidade dos processos de meteorização física e química aos quais são submetidos os afloramentos rochosos, os solos e os demais componentes da paisagem.

Dos sistemas meteorológicos existentes no Norte e Nordeste, e conseqüentemente sobre a zona costeira maranhense, que regulam os padrões de precipitação o principal é a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). O setor oriental do estado do Maranhão tem um clima tropical quente e semiúmido do tipo Aw, de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, indicando um verão quente - úmido e um inverno mais seco. (PEREIRA *et al.* 2016; SANTOS, 2008).

Segundo Molion e Bernado (2002, p.1336) “a ZCIT é uma grande região de confluência dos ventos alísios de nordeste, e dos ventos alísios de sudeste”, constituída de nebulosidade e chuvas no sentido leste-oeste. Essa zona influência nas precipitações observadas sobre os continentes africano, americano e asiático, também tem grande contribuição para nordeste brasileiro, assim como o norte e centro do Maranhão e Piauí (PAULA, 2013).

A ZCIT possui uma marcha anual sobre o Atlântico, partindo do hemisfério Norte, cerca de 14 °N em agosto-setembro, para a posição mais ao sul, cerca de 4 °S, durante março-abril. Seu deslocamento é responsável pelas chuvas que ocorrem no norte do Nordeste do Brasil (NNE), durante sua estação chuvosa e as suas alterações de intensidade posicionamento causam variações dos Alísios de nordeste. (MOLION e BERNARDO, 2002)

Acerca desse deslocamento anual, Paula (2013) assim como Carvalho e Oyama (2013) afirmam que no mês de janeiro a ZCIT já atinge boa parte do continente sul-americano, influenciando o regime de chuvas principalmente do litoral do Amazonas, Pará e Maranhão, com presença de ventos com direção NE, E, SE e N. De fevereiro a abril a ZCIT atinge sua posição máxima no hemisfério Sul ocasionando ventos provenientes de NNE (Figura 20) e as máximas pluviais. Ao regressar para o hemisfério Norte, a partir de maio a junho, as precipitações pluviométricas começam a ser mais espaçadas dando início ao período de estiagem. No auge desse período, julho a novembro, os ventos sopram na direção E-W e com maior intensidade em toda porção norte da Região Nordeste.

A Região Nordeste não apresenta as quatro estações climáticas bem definidas, a estação chuvosa apresenta uma pluviometria concentrada e irregular resultando num regime pluviométrico caracterizado por mínimos no inverno, agosto a dezembro e máximos no verão que vai de janeiro a julho, as chuvas se concentram no primeiro semestre do ano, contribuindo com o potencial pluviométrico. (CARVALHO e OYAMA, 2003; PAULA, 2013).

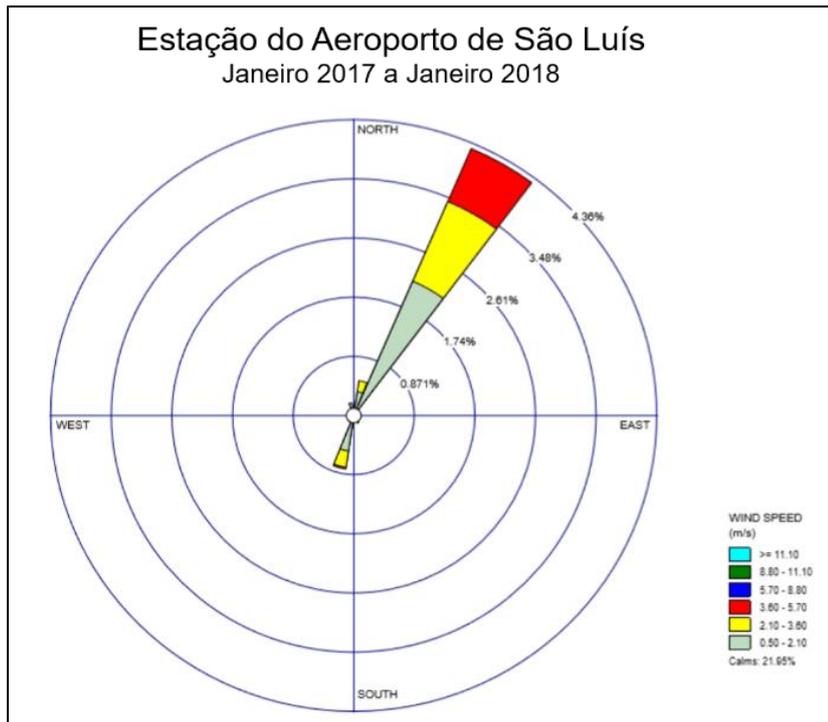


Figura 20: Rosa dos ventos com base de dados INMET, para a estação do Aeroporto de São Luís, construída no software WRPLOT.

Em análise dos dados históricos (1970-2010) do INMET e estudos de Gonçalves *et al.* (2005), na região costeira do Maranhão, identifica-se que a estação chuvosa normalmente ocorre entre janeiro e junho, com pluviosidade média anual de 1600 a 2200 mm/ano. Cerca de 70% do volume total das precipitações está concentrado nos meses de janeiro a maio enquanto estação seca normalmente se estende de julho a dezembro, com as menores taxas de precipitação (20 mm por mês) ocorridas entre setembro e novembro. (Figura 21)

A temperatura tem importância fundamental no desenvolvimento das paisagens. É ela que dimensiona diretamente a pressão atmosférica e a evaporação e interage efetivamente com o vento, um dos principais agentes morfogenéticos da geomorfologia litorânea.

A variabilidade das temperaturas médias são características das estações do ano, onde os valores mínimos são observados durante o período chuvoso, de janeiro a junho com valores máximos de em torno de 27°C, os valores mais elevados são observados na primavera-verão, de setembro a março. A máxima temperatura absoluta acontece entre novembro e janeiro, com média aproximada de 38,5°C, com aumento dos ventos soprando na direção NE-SW.

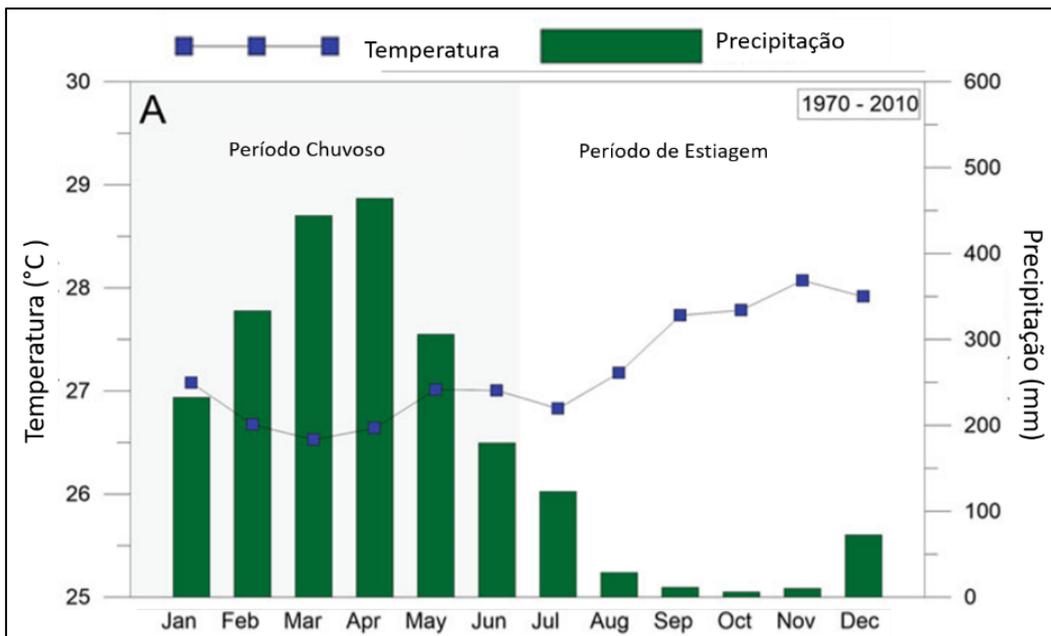


Figura 21: Média do total mensal da temperatura do ar e chuvas registradas entre 1970 e 2010, dados do INMET (Estação de São Luís)
 Fonte: Adaptado de Pereira *et al.* (2016)

O vento assume papel de grande importância principalmente no que se refere ao transporte e deposição dos sedimentos, na formação das ondas e na esculturação do relevo. Exerce um papel fundamental no litoral do nordeste haja vista a acumulação de dunas e praias arenosas desde o litoral norte do Rio Grande do Norte até o Golfão Maranhense (CHRISTOFOLETTI, 1980; MARANHÃO, 1998).

A atividade eólica da área de estudo, a exemplo do litoral norte brasileiro, segue essencialmente a circulação de grande escala, com predominância de fluxo zonal de leste e atingindo uma velocidade média em torno de 5 m/s, tendo a predominância de NE (Figura 22). Variam no período chuvoso quando predominam ventos de calma e ventos suaves, intercalados por ventos fortes no período seco, quando são mais recorrentes os ventos médios e fortes, com velocidades entre 22 e 35 km/h. (PEREIRA *et al.*, 2016)

Durante os meses de dezembro a abril, a ZCIT desloca-se no sentido meridional, quando se verifica a presença dos alísios de Leste são tipicamente inferiores a 5 m/s^{-1} (Figura 23) e a temperatura média é de $26,8 \text{ } ^\circ \text{C}$. No período de julho a novembro a referida zona desloca-se para o norte, afastando-se do Equador, quando os alísios de Nordeste se tornam mais efetivos com velocidades superiores a 6 m/s^{-1} e a temperatura do ar acima de $27 \text{ } ^\circ \text{C}$ resultando em temperaturas mais altas e baixas taxas de precipitação,

principalmente devido à influência das linhas de instabilidade associadas à brisa do mar (CARVALHO *et al.*, 2006).

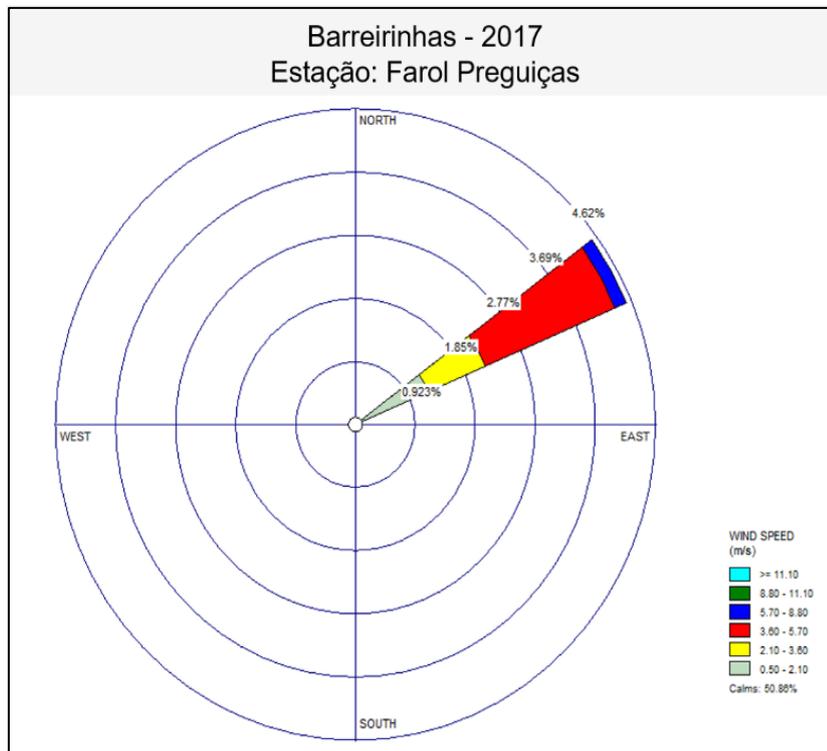


Figura 22: Rosa dos ventos com base de dados INMET, para a estação Farol Preguiças no Parque dos Lençóis Maranhenses, construída no software WRPLOT.

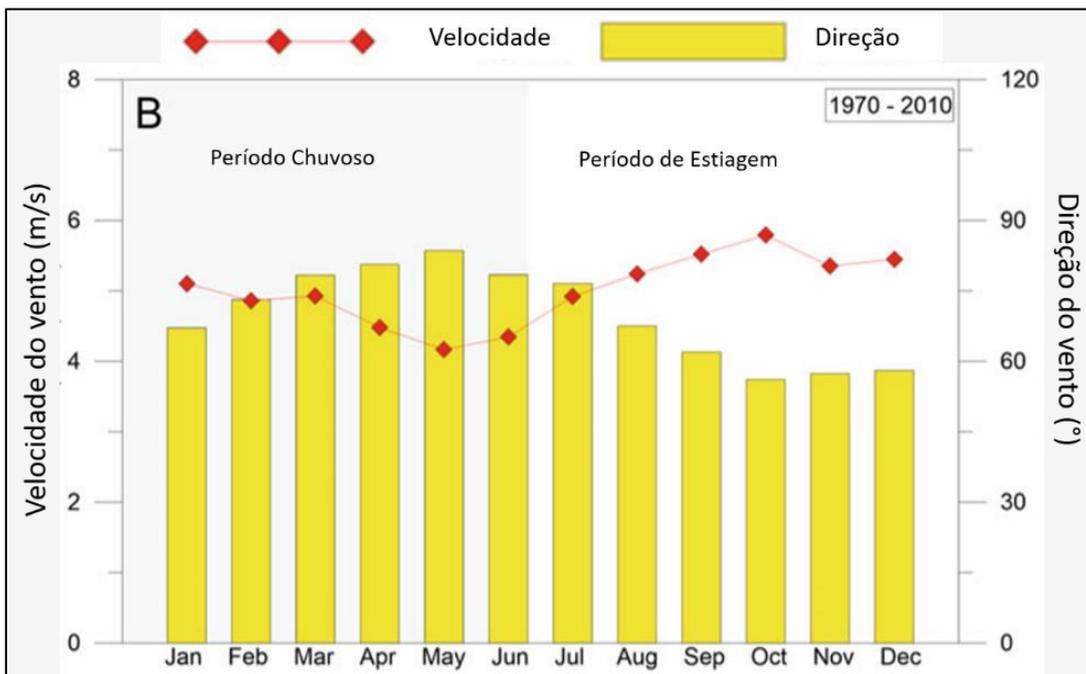


Figura 23: Média do total mensal da direção e velocidade do vento registrados entre 1970 e 2010, dados do INMET (Estação de São Luís)
Fonte: Adaptado de Pereira *et al.* (2016)

A região ZCIT compreende a área de baixa pressão onde ocorre a interação entre a confluência dos ventos alísios, as áreas de máxima Temperatura da Superfície do Mar (TSM), a região do cavado equatorial e de máxima convergência de massa e é marcada por aglomerados de nuvens convectivas (UVO, 1989 *apud* DIAS e DE BRITO, 2017)

Menezes *et al.* (2008) e Chaves (2011) afirmam que a TSM afeta a posição da ZCIT que conseqüentemente influencia na distribuição das chuvas sobre o Nordeste. A escassez de chuvas e incidência maior de ventos são relacionadas às anomalias da TSM, que por sua vez ocorrem junto aos eventos do El Niño, acompanhando também sua intensidade, bem como os eventos de La Niña e TSM positivas no Atlântico Sul com anos chuvosos no NE (Tabela 5). Embora estes dois fenômenos tenham uma tendência a se alternar a cada 3 a 7 anos, pode ocorrer que de um evento ao seguinte o período de recorrência possa variar de 1 a 10 anos (MOLION e BERNADO, 2002; SANTOS, 2008).

Tabela 5: Ocorrência histórica do El Niño e La Niña.
Fonte: CPTEC/INPE

El Niño				La Niña		
Fraco - 10	Moderado - 7	Forte - 5	Muito forte - 3	Fraco - 10	Moderado - 4	Forte - 7
1952-53	1951-52	1957-58	1982-83	1954-55	1955-56	1973-74
1953-54	1963-64	1965-66	1997-98	1964-65	1970-71	1975-76
1958-59	1968-69	1972-73	2015-16	1971-72	1995-96	1988-89
1969-70	1986-87	1987-88		1974-75	2011-12	1998-99
1976-77	1994-95	1991-92		1983-84		1999-00
1977-78	2002-03			1984-85		2007-08
1979-80	2009-10			2000-01		2010-11
2004-05				2005-06		
2006-07				2008-09		
2014-15				2016-17		

A velocidade dos ventos também está relacionada à circulação local/regional aumentando com a proximidade do litoral, como quando a brisa do mar e os ventos alísios coincidem, na chegada da primavera e o início do verão, eles geraram os ventos de maior velocidade do leste-nordeste, que aumentam a altura da onda e o transporte de areia eólica. (ZCEM/MARANHÃO,2003; PAULA, 2016).

Paula (2013) em experimentos no litoral do Piauí constatou que a velocidade máxima dos ventos na costa atinge os $10,7 \text{ m s}^{-1}$, o que geralmente excede o valor mínimo necessário para o transporte de sedimentos ($3,05 \text{ m s}^{-1}$) inferior a $0,25 \text{ mm}$ de diâmetro (correspondente a areia média e fina), sob a ação dos ventos influencia na competência de transporte de sedimentos principalmente para Parque dos Lençóis Maranhenses.

4.5.Fatores oceanográficos.

O fator oceanográfico relaciona-se com a natureza da água do mar apresentando graus de salinidade que oscila de acordo com a localização geográfica. Os principais agentes morfológicos ligados ao fator oceanográfico são as ondas, correntes e marés. A intensidade da ação destes agentes, em uma determinada área, depende das condições gerais do ambiente como temperatura, direção e intensidade do vento, salinidade, amplitude das marés e do relevo, estrutura geológica, dentre outros (FEITOSA, 1989; CHRISTOFOLETTI, 1981).

O vento é o elemento climático responsável por gerar as ondas, que por sua vez gera as correntes e que, juntamente às marés, estabelecem o padrão de circulação das águas marinhas nas zonas litorâneas (MUEHE, 2006). Quanto maior a velocidade, duração e extensão da área sob influência do vento, maior será a onda, e esta por sua vez transmite energia e executam a maior parte do trabalho de esculturação das paisagens costeiras (MUEHE, 2011) associadas ao transporte de sedimentos aluviais do Parnaíba, a exemplo da área de estudo, conforme Lins (1978).

Os cordões arenosos alimentados pelos aluviões do Parnaíba deslocam-se continuamente, para o oeste. A disposição das ilhas do delta evidencia, por sua vez, a direção leste-oeste das correntes costeiras, tangidas pelos ventos. Essa direção é decorrente da deflação, na zona subequatorial, dos alísios de NE que sopram na costa setentrional do Nordeste do Brasil durante todo o ano (LINS, 1978).

Short (2016) atentou para o detalhe da dificuldade de obter informações e dados de ondas ao pesquisar o litoral brasileiro, grande parte dos dados existentes foram obtidos através de projetos de pesquisa, com períodos de monitoramento e dados privados inerentemente limitados e mais da metade desses foram obtidos a partir da estimativa visual.

Essa limitação de acesso às informações dificulta a evolução de estudos da dinâmica costeira, principalmente no norte da Região Nordeste, já que no conjunto dos agentes que atuam no modelado costeiro, as ondas desempenham papel importante exercendo maior influência em áreas de relevo sedimentar como praias e dunas, que estão sujeitas a constantes modificações causadas, principalmente, pelas ondas e correntes. (MUEHE, 2006 e 2011)

A direção da frente de ondas, predominante no Litoral Oriental maranhense, é de N90 e N45 com altura entre 0,5 e 1 m, o que influencia para a região costeira apresentar uma deriva litorânea efetiva de sedimentos (sentido no qual a maioria do material sedimentar se move durante um longo período de tempo), de leste para oeste (SANTOS, 2008).

A influência das marés na esculturação do litoral é direta e relacionada com as variações do nível do mar que lhe são aplicadas. O desmonte de dunas a invasão das águas do mar interfere no processo de acumulação das areias acarretando em efeitos erosivos que, ao modificar as condições de acumulação produzida pela ação eólica (circulação dos ventos e deposição das partículas arenosas no sopé das dunas semi-fixas), contribuem para alteração no perfil litorâneo (BRANCO *et al.*, 2003).

Esses agentes participam do processo de seleção desses grãos por peso e tamanho. Os grãos maiores são depositados de forma mais rápida enquanto que os menores por serem de fácil movimentação, são mantidos em suspensão e arrastados pelas correntes ao longo da costa, configurando o formato da costa litorânea.

Os ventos e as ondas do nordeste conduzem uma corrente que pode dominar os fluxos de maré reduzindo a corrente para o sudeste durante as marés baixas. Ao longo dos 60 km da costa oriental do Maranhão, onde uma série de ilhas barreira são formadas perto da foz do rio Parnaíba, existem algumas praias protegidas de maré de baixa energia e maré modificadas. (FEITOSA, 1989).

A área de estudo recebe influência indireta da corrente Sul-Equatorial através do aporte de sedimentos próximos a região sublitorânea. Esse material é posteriormente retrabalhado pelas correntes litorâneas formadas pela incidência oblíqua das ondas em determinados períodos do ano e depositado ao longo da costa. Ao trabalho das correntes litorâneas nas proximidades do litoral da área de estudo, juntamente com a disponibilização de sedimentos oferecidas pelo Delta do Parnaíba atribui-se o aparecimento de ilhas no litoral do município e a

grande quantidade de sedimentos na costa que influencia a área em questão. (MARANHÃO/ZCEM, 2003; SANTOS, 2008).

A corrente litorânea com sentido para noroeste é um dos principais agentes de transporte de areia para as praias deste setor da costa, carregando uma carga significativa de sedimentos desde os estados do Rio Grande do Norte, passando pelo Ceará e aumentando ainda mais no Piauí junto ao delta do rio Parnaíba. (GONÇALVES *et al.*, 2005)

Pereira *et al.* (2016) afirma que ao longo do setor oriental do litoral maranhense, ocorrem os processos costeiros de meso-maré semidiurnas (> 3 m), as variações mais altas e mais baixas na costa aberta são 7 m no golfo do Maranhão e 3 m no delta Parnaíba, respectivamente. Em Tutóia o intervalo fica de 3 m e 2 m., o intervalo relativo de maré (RTR) é de (TR = 3 m, H b = 1,4 m, RTR = ~ 2) (Figura 24).

Paula (2013) ao caracterizar o litoral do Piauí, partindo do Delta do Parnaíba afirma que os valores mais altos de maré na estação seca estão relacionados às velocidades dos ventos, as meso-marés presentes apresentam o alcance máximo de 3,7 m. Ainda segundo o autor as margens meso-marés são responsáveis por alterações significativas no processo de sedimentação costeira. Na maré alta, as correntes costeiras são mais fortes sendo o principal componente do transporte de sedimentos na zona costeira, trazendo como consequência erosão e deposição, respectivamente, de sedimentos no sentido NE-WO.

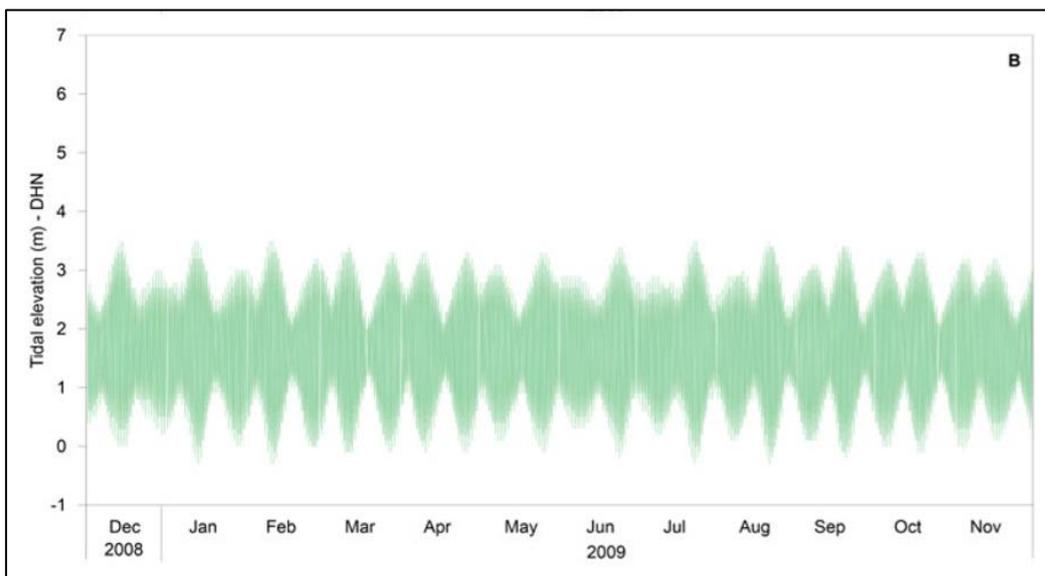


Figura 24: Curva de maré em Tutóia entre dezembro de 2008 e novembro de 2009. DHN (Departamento de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil).

Fonte: Pereira *et al.* (2016)

5. Materiais e Métodos

5.1. Levantamento de dados bibliográfico e cartográfico

Para o desenvolvimento da atual pesquisa, foi inicialmente realizado levantamento bibliográfico para fundamentação teórica, definição dos métodos e técnicas que serviram como modelo e base. Buscou-se informações em artigos científicos, monografias, dissertações e teses e também dados digitais georreferenciados que foram utilizados para registros das imagens orbitais como arquivos no formato “shapefiles” nas seguintes fontes:

- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), shapefiles das Unidades Federativas e Municípios, Escala 1:100.000;
- Secretaria de Estado de Meio Ambiente do Maranhão (SEMA), shapefiles da Hidrografia e áreas urbanas, Escala 1:50:000;
- Serviço Geológico do Brasil (CPMR), shapefiles com informações Geológicas-ambientais.

5.2. Levantamento de Campo

Foram realizados trabalhos de campo para a aplicação de entrevistas com a comunidade. Tais entrevistas tinham o objetivo de realizar um reconhecimento da área e compreender a percepção da dinâmica ambiental segundo a ótica dos moradores. Estes trabalhos ocorreram em duas etapas, a primeira em Julho de 2016 e a segunda em Janeiro de 2017. Foram realizadas 15 entrevistas qualitativas e subjetivas com a comunidade para mensuração dos problemas associados a erosão, soterramento por dunas, e migração da população para novas áreas, na sede do município de Tutóia, distribuídos nos bairros São José, Aeroporto e Cajueiro. As entrevistas seguiram o seguinte roteiro:

- Quanto tempo reside no local;
- Já sofreu algum problema ou prejuízo em relação ao movimento de dunas;
- Por quais motivações reside no local;

Destas entrevistas foram retiradas informações para a elaboração do mapa de mobilidade da população a partir de pontos coletados, residências antigas e posição de dunas, com base na orientação dos próprios moradores locais com uso de GPS, da marca Garmin Etrex 30, dos locais onde houve soterramento de residências por conta do avanço das dunas, posicionando assim essa informação no espaço e no tempo.

Durante o trabalho de campo também foi feito levantamento da dinâmica ambiental, como monitoramento de deslocamento de dunas e de pontos de erosão da costa, com datas de 2016 e 2017, realizadas com coletas de pontos de GPS e comparadas ao serem aplicadas às imagens de satélite de seus respectivos anos, com o propósito de verificar as mudanças ocorridas.

5.3.Sensoriamento Remoto

5.3.1.Preparação da base cartográfica e Aquisição das imagens

Para realização do estudo foram adquiridas imagens obtidas pelo sensor Mapeador Temático (TM) do satélite Landsat 5 e sensor Operational Land Imager (OLI) Landsat 8, referentes ao ponto 62 e a órbita 219 dos anos de 1994,1998, 2001, 2005, 2009, 2012, 2016 e 2017 disponíveis gratuitamente junto à Divisão de Geração de Imagens (DGI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), no endereço eletrônico: <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>. Todos os procedimentos de geoprocessamento, (georreferenciamento, reprojeção geográfica, vetorização) foram realizados no Software ArcGIS 10.2.2.

Dentre as imagens adquiridas foi realizada uma triagem inicial, onde as referentes aos anos de 1994, 2001, 2009 e 2017 (Tabela 6) foram selecionadas para análise multitemporal. Tal seleção levou em consideração a melhor qualidade das imagens e a menor porcentagem de cobertura de nuvens, além do tamanho da cena capaz de visualizar todo o campo de dunas, o que permitiu a avaliação em series temporais sempre na mesma época do ano, mais especificamente no mês de Julho.

As imagens Landsat utilizadas na pesquisa possuem uma resolução espacial aproximada de 30 metros; foram escolhidas para o presente trabalho pela qualidade das cenas oferecidas e por não demandar custos ao usuário sendo oferecidas pelo INPE. Para analisar a evolução multitemporal das dunas foram selecionadas quatro cenas de imagens orbitais da série Landsat, três do sistema Landsat5/TM (1994, 2001 e 2009) e uma do sistema Landsat 8/OLI

(2017). As principais características e aplicações dos satélites usados são expostas de acordo com as tabelas 7 e 8.

Tabela 6: Especificações imagens Landsat selecionadas

Fonte: Divisão e geração de imagens INPE

PLATAFORMA	LANDSAT 5	LANDSAT 5	LANDSAT 5	LANDSAT 8
SENSOR	TM	TM	TM	OLI
ANO	1994	2001	2009	2017
DATA	05/07/1994	15/07/2009	20/07/2009	29/07/2017
ORBITA/ PONTO	219/62	219/62	219/62	219/62

Tabela 7: características e aplicações das bandas espectrais imagens Landsat 5TM

Fonte: Divisão e geração de imagens INPE

Banda	Intervalo espectral (μm)	Principais características e aplicações das bandas <i>TM</i> dos satélites LANDSAT 5
1	(0,45 - 0,52)	Apresenta grande penetração em corpos de água, com elevada transparência, permitindo estudos batimétricos. Sofre absorção pela clorofila e pigmentos fotossintéticos auxiliares. Apresenta sensibilidade a plumas de fumaça oriundas de queimadas ou atividade industrial. Pode apresentar atenuação pela atmosfera.
2	(0,52 - 0,60)	Apresenta grande sensibilidade à presença de sedimentos em suspensão, possibilitando sua análise em termos de quantidade e qualidade. Boa penetração em corpos de água.
3	(0,63 - 0,69)	A vegetação verde, densa e uniforme, apresenta grande absorção, ficando escura, permitindo bom contraste entre as áreas ocupadas com vegetação (ex.: solo exposto, estradas e áreas urbanas).
4	(0,76 - 0,90)	Os corpos de água absorvem muita energia nesta banda e ficam escuros, permitindo o mapeamento da rede de drenagem e delineamento de corpos de água.
5	(1,55 - 1,75)	Apresenta sensibilidade ao teor de umidade das plantas, servindo para observar estresse na vegetação, causado por desequilíbrio hídrico. Esta banda sofre perturbações em caso de ocorrer excesso de chuva antes da obtenção da cena pelo satélite.
6	(10,4 - 12,5)	Apresenta sensibilidade aos fenômenos relativos aos contrastes térmicos, servindo para detectar propriedades termais de rochas, solos, vegetação e água.
7	(2,08 - 2,35)	Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo obter informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Esta banda serve para identificar minerais com íons hidroxilas. Potencialmente favorável à discriminação de produtos de alteração hidrotermal.

Tabela 8: Características das imagens do satélite Landsat 8

Fonte: Divisão e geração de imagens INPE

BANDA	SENSOR	INTERVALO ESPECTRAL (μM)	SIGNIFICADO	RESOLUÇÃO ESPACIAL (M^2)
1	OLI	0,43 – 0,45	Aerossol, costeira	30
2	OLI	0,45 – 0,51	Azul	30
3	OLI	0,53 – 0,59	Verde	30
4	OLI	0,64 – 0,67	Vermelho	30
5	OLI	0,85 – 0,88	IV Próximo	30
6	OLI	1,57 – 1,65	SWIR 1	30
7	OLI	2,11 – 2,29	SWR 2	30
8	OLI	0,50 – 0,68	Pancromático	15
9	OLI	1,36 – 1,38	Cirrus	30
10	TIRS	10,60 – 11,19	Cirrus	100
11	TIRS	11,50 – 12,51	Cirrus	100

5.3.2. Pré-processamento

Normalmente ao adquirir imagens de diferentes anos as mesmas apresentam pequenos pontos de incompatibilidades entre sistemas de projeção e essa etapa de Georreferenciamento é extremamente importante para corrigir distorções e eliminar erros devido a passagem do satélite e curvatura da Terra.

Na etapa de pré-processamento são realizados procedimentos e técnicas de geoprocessamento que preparam e corrigem as imagens antes que os dados possam ser gerados para análise, como as imagens Landsat 8, que são disponibilizadas na projeção Geográfica WGS 1984 para o hemisfério Norte.

Além da reprojeção das bandas da imagem no ArcGIS 10.2 para o hemisfério Sul utilizando o algoritmo “*Project Raster*” (Arc Toolbox > Projections and transformations> Raster> Project Raster) foi realizado o registo de todas as outras imagens utilizadas para Coordenadas UTM– Zona 24 S - Datum WGS84 através do Georreferenciamento utilizando pontos de controle que se coincidem em todas as imagens utilizando um arquivo Shapefile, de ruas, quadras e rodovias do município, de escala 1:50.000, disponibilizado pelo SEMA-MA.

Para servir de plano de fundo dos mapas temáticos, foi adquirido Imagens do Google Earth com data de 29/06/2016 e georreferenciadas através de pontos de controle inseridos na imagem e shapefiles com Coordenadas UTM– Zona 24 S - Datum WGS84

5.3.3.Processamento de imagens e Elaboração de mapas temáticos

No processamento de imagens são realizadas análises e a manipulação de modo que facilite o entendimento e diferenciação por parte do receptor com a finalidade de extrair informações.

5.3.3.1.Composições Testadas

Após testes de combinações de bandas, chegou-se na composição RGB 521 nas Imagens Landsat 5 e RGB 632 na Imagem Landsat 8. Que permitiu uma boa percepção da deriva litorânea e a mudança da linha costa; as dunas móveis foram destacadas em tonalidades de branco (Figura 25).

A combinação (RGB 521/632) atendeu o propósito de realçar a visualização do campo de dunas móveis e posteriormente foram aplicadas as composições de Cores Naturais (RGB Landsat 5, 321/Landsat 8, 432) para diferenciar os outros elementos presentes na imagem. Os procedimentos de processamento de imagens digitais dos elementos multiespectrais da família Landsat, foram empregadas eficientemente para evidenciar pequenos contrastes na característica de cada elemento da paisagem.

COMPOSIÇÃO COLORIDA PARA REALCE DAS DUNAS



Imagem Landsat 5 (1994)
Bandas 5,2,1



Imagem Landsat 5 (2001)
Bandas 5,2,1

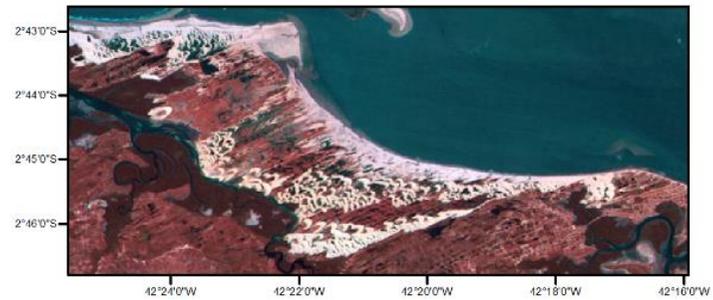


Imagem Landsat 5 (2009)
Bandas 5,2,1

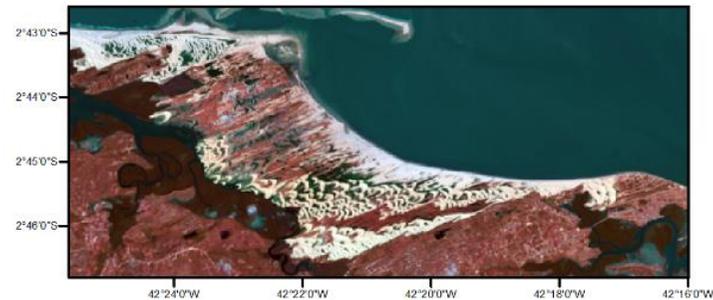
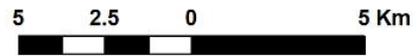


Imagem Landsat 8 (2017)
Bandas 6,3,2



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 24S
Projection: Transverse Mercator



Figura 25: Composição colorida para realce das dunas.

5.3.3.2.Vetorização

O método de vetorização foi aplicado para análise temporal e mapeamento das coberturas no entorno dos campos de dunas e evolução da linha de costa para a identificação de processos associados a erosão e progradação.

O método de interpretação das feições sobre as imagens foi o visual por conta do conhecimento da área de estudo por parte da autora da pesquisa o que ajudou na diferenciação das categorias naturais e na espacialização dos pontos marcados em campo. A vetorização consistiu na construção de linha e polígonos em torno dos principais alvos mapeados e os shapefiles foram gerados a partir de uma interpretação pessoal, seguindo principalmente critérios da fundamentação teórica e confirmados por levantamento em campo.

Erosão e progradação

Para a elaboração do mapa temático “Evolução da Linha de Costa” foram analisadas as imagens Landsat 5 dos anos 1994, 2009 e 2017, pois foram as imagens que melhor permitiram visualização e interpretação. Foram escolhidos pontos da faixa litorânea da sede do município onde houveram relatos de mudanças na posição da linha de costa ao longo de 4,84 km. Foi considerado como linha de costa a zona úmida deixada pelo espraiamento máximo das ondas na praia.

Foram construídos, utilizando o software de geoprocessamento ArcGis 10.2.2, três shapefiles vetorizados e georreferenciados, através de pontos de controle coletados em campo na Praia da Moita Verde, no Pontal dos Félix, na Praia da Barra e Pontal da Andreza. Os shapefiles resultantes foram sobrepostos à Imagem Google Earth (de maior resolução) que permitiu uma melhor visualização dos processos costeiros mapeados.

Também foram realizadas medições para quantificar o deslocamento das linhas de costa através da comparação entre elas, com base no método utilizado por Santos (2006, p.30). Foram realizadas medições em 32 linhas traçadas no sentido N-S, perpendicular a orientação da linha de costa (Figura 26) ao longo dos 4,85km estudados, com espaçamento de 150m entre as medições, permitindo obter o cálculo da área de cada polígono associado aos processos de erosão ou progradação observados.

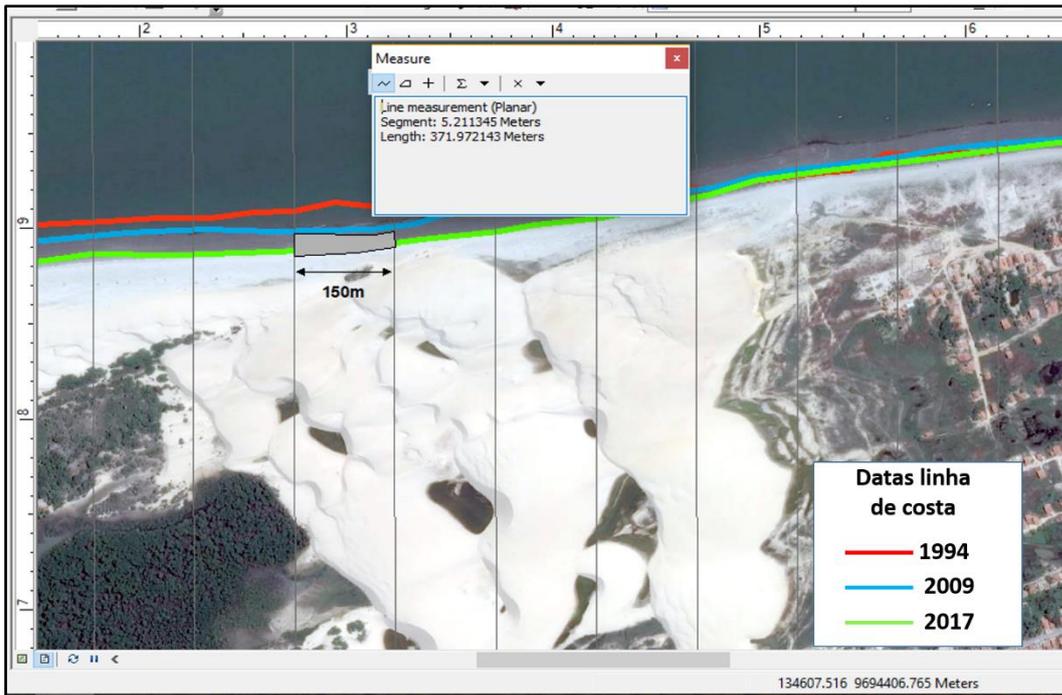


Figura 26: Área de trabalho ArcGis 10.2.2 com as 32 linhas traçadas no sentido N-S, com espaçamento de 150m entre elas, para calcular a área de cada polígono.

Os valores dos perímetros foram extraídos e submetidos às fórmulas utilizadas por Santos (2006) para encontrar as taxas médias de erosão e progradação, assim como a velocidade média dos processos; valor da área erodida é a soma de todos os 32 trechos de 150m dispostos ao longo da costa.

Erosão:

$$E_m = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} A_i}{N_p}$$

Onde:

A_i = valor de cada trecho medido

E_m = erosão média

N_p = número de pontos

Σ = somatório

Velocidade:

$$V_{E_m} = \frac{E_m}{T}$$

Onde:

V_{E_m} = velocidade da taxa de erosão média

E_m = erosão média

T = período

Dunas

O mapa temático de mobilidade do campo de dunas foi elaborado a partir dos dados e marcações de pontos coletados com o uso de GPS durante os trabalhos de campo a partir das informações históricas fornecidas pelos moradores. A posição de construções soterradas e/ou ameaçadas pelo avanço das dunas mapeadas em campo também forneceram dados para a confecção desse mapa. Foi dado ênfase às três dunas específicas para caracterizar a dinâmica e a coleta de posicionamento de quatro residências atingidas pelas dunas (Figura 27)

Após a o georreferenciamento das imagens, foram selecionadas as imagens 1994, 2001 e 2009 nas composições RGB 521 nas Imagens Landsat 5 e 2017 na composição RGB 632 na Imagem Landsat 8, por ter uma melhor visualização. O objetivo dos mapas temáticos criados era permitir a visualização da modificação da paisagem ao longo dos anos.

Uma forma de compreender melhor a transformação da paisagem em campos de dunas é analisando o comportamento eólico atuante na área. Para o campo de dunas de Tutóia buscou-se informações da dinâmica pretérita, baseando-se principalmente nos trabalhos de Santos (2008) e Gonçalves (2003) voltados para os Lençóis Maranhenses e Paula (2013) que possui boas contribuições para o litoral do Piauí.

A metodologia aplicada para medir em metros a migração das dunas foi seguir a direção de deslocamento dos sedimentos em relação a direção predominante dos ventos (Figura 28). Foram identificadas as faces de deslizamento das dunas (Figura 29) e traçadas retas ligando-as os vetores gerados de cada ano estudado (Figura 30). Posteriormente, para medir a velocidade de migração foi aplicada a formula de velocidade universal a seguir, a exemplo de Meireles (2011):

$$V_{m/a} = \frac{E_m}{T_a}$$

Onde:

V= velocidade em metros por ano.

E= espaço percorrido por duna em metros.

T= intervalo de tempo em ano

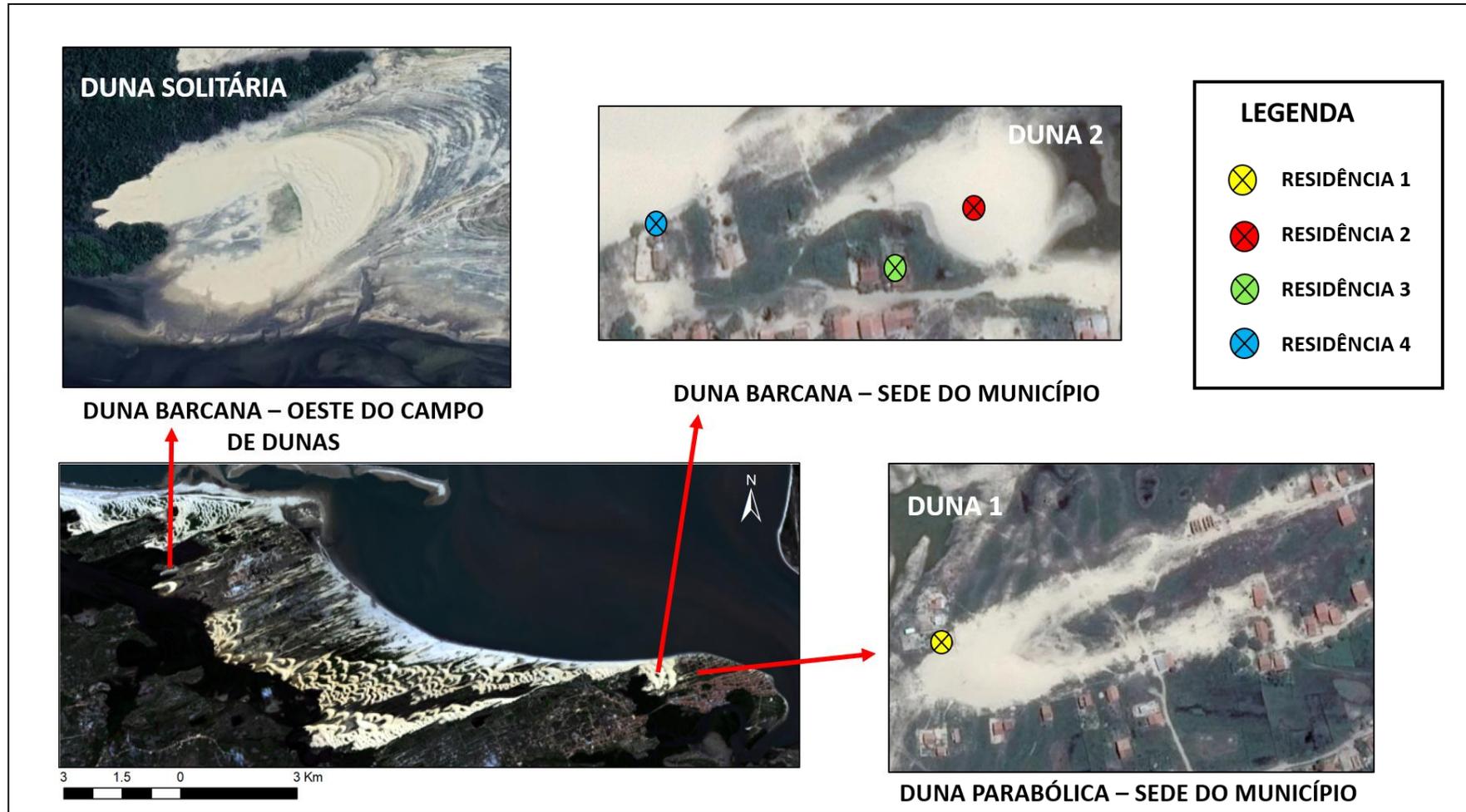


Figura 27: Detalhamento dos pontos coletados em campo e sua localização na área de estudo.

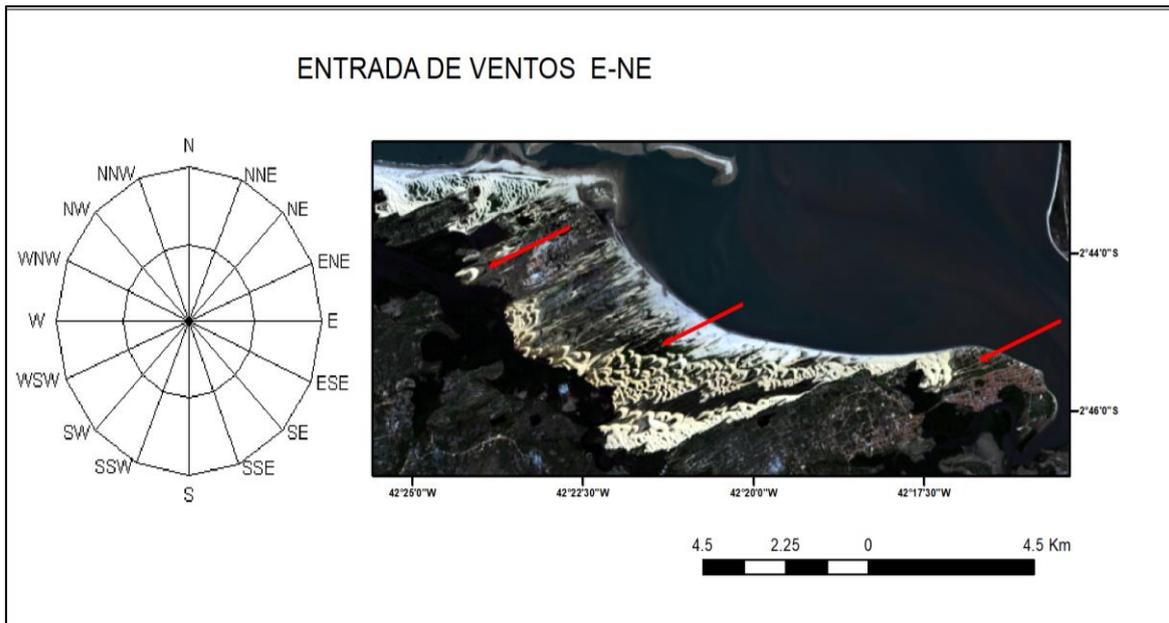


Figura 28: Disposição do litoral do município de Tutóia e a entrada de ventos de E-NE (setas em vermelho).



Figura 29: Face de Deslizamento de uma duna em relação à direção do vento. Fonte Adaptado de Schweich (1999).

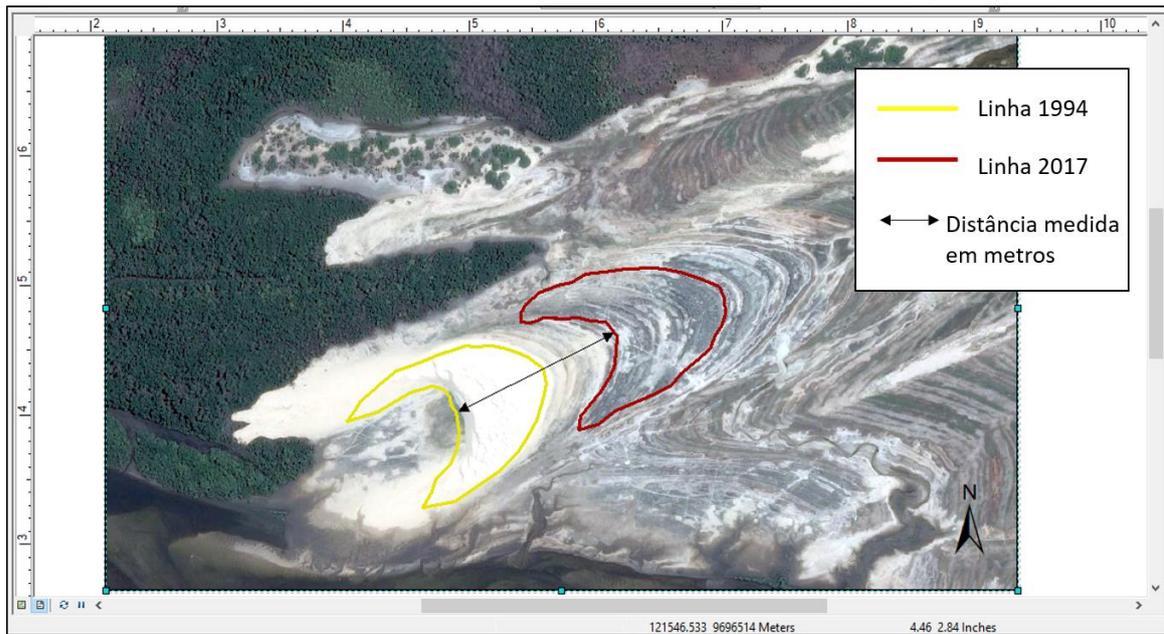


Figura 30: Medida da distância entre as faces de deslizamento em metros (representada pela seta) levando em consideração a direção do vento ENE-WSW. Imagem tirada da área de trabalho do Arcgis 10.2.2.

6. Resultados e discussões

6.1. Linha de Costa

Durante o processo de vetorização das imagens Landsat, foram selecionadas as imagens dos anos de 1994, 2009 e 2017 para a identificação da mobilidade da linha de costa (Figura 32). Intervalos menores de tempo entre as imagens não permitiram a observação de mudanças significativas.

Através da análise do mapa gerado (Figura 33) foi possível verificar alterações no posicionamento da praia nos pontos monitorados. O processo predominante na maior parte da costa estudada foi o de erosão (Figura 31), associado a retrogradação da linha de costa. Apenas no ponto Monumento Barco de São Pedro o processo de progradação foi observado, processo este relacionado a intervenções de origem antrópica. O trecho em questão foi aterrado no ano de 1996 para a construção de ruas para facilitar o acesso de veículos à praia e apresenta apenas uma variação de área no decorrer dos períodos trabalhados, mantendo-se estável desde então.

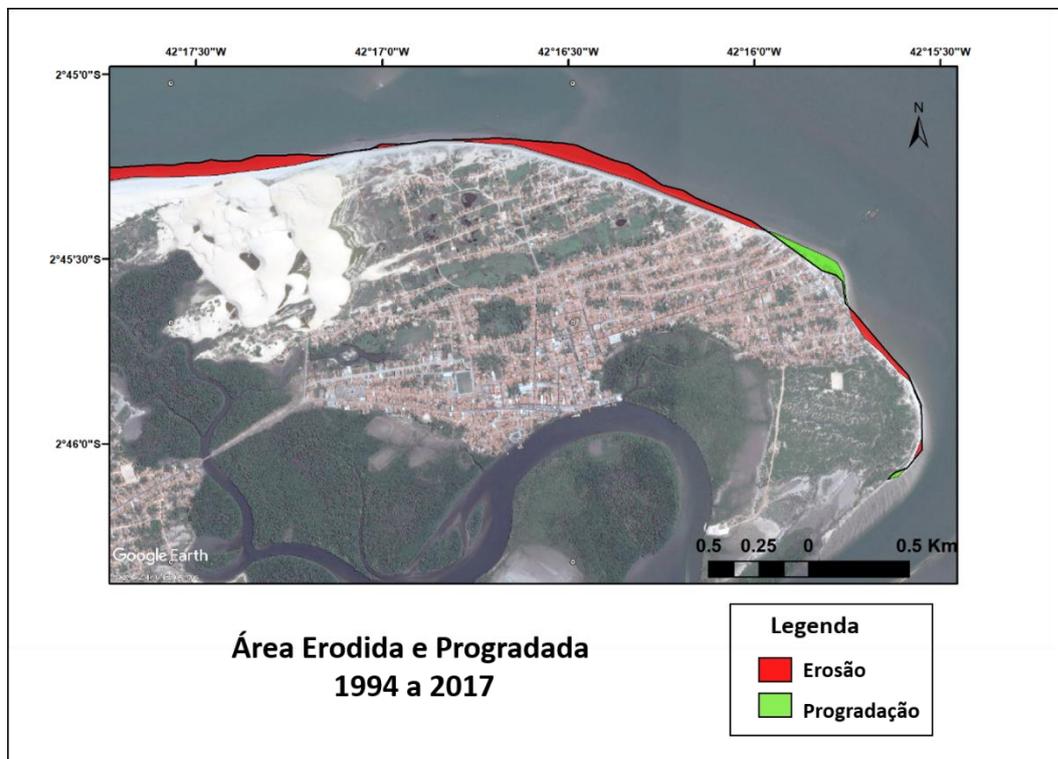


Figura 31: Área erodida e progredada entre os anos de 1994 e 2017, onde é visível a predominância de erosão no período estudado

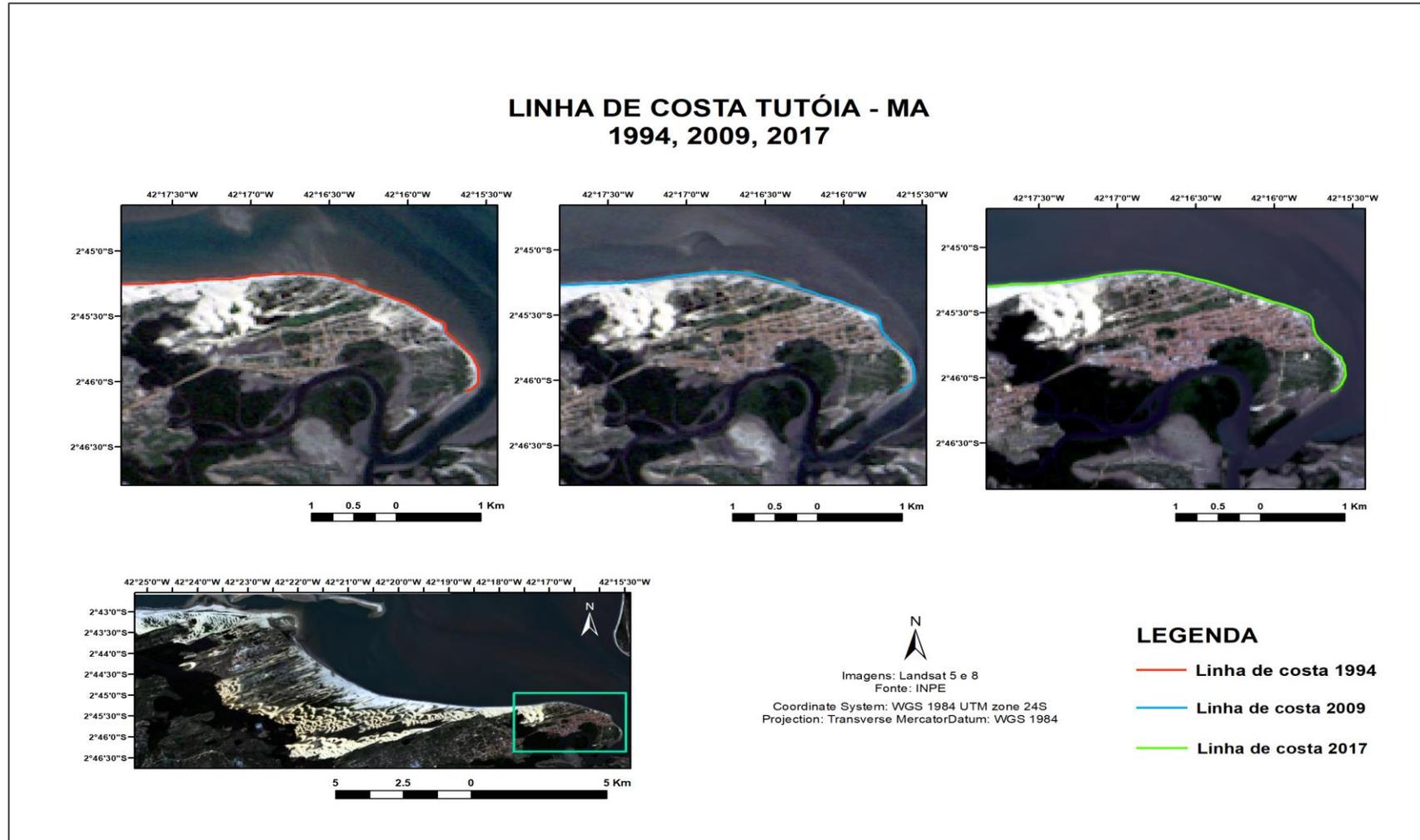


Figura 32: Imagens selecionadas para análise Linha de Costa

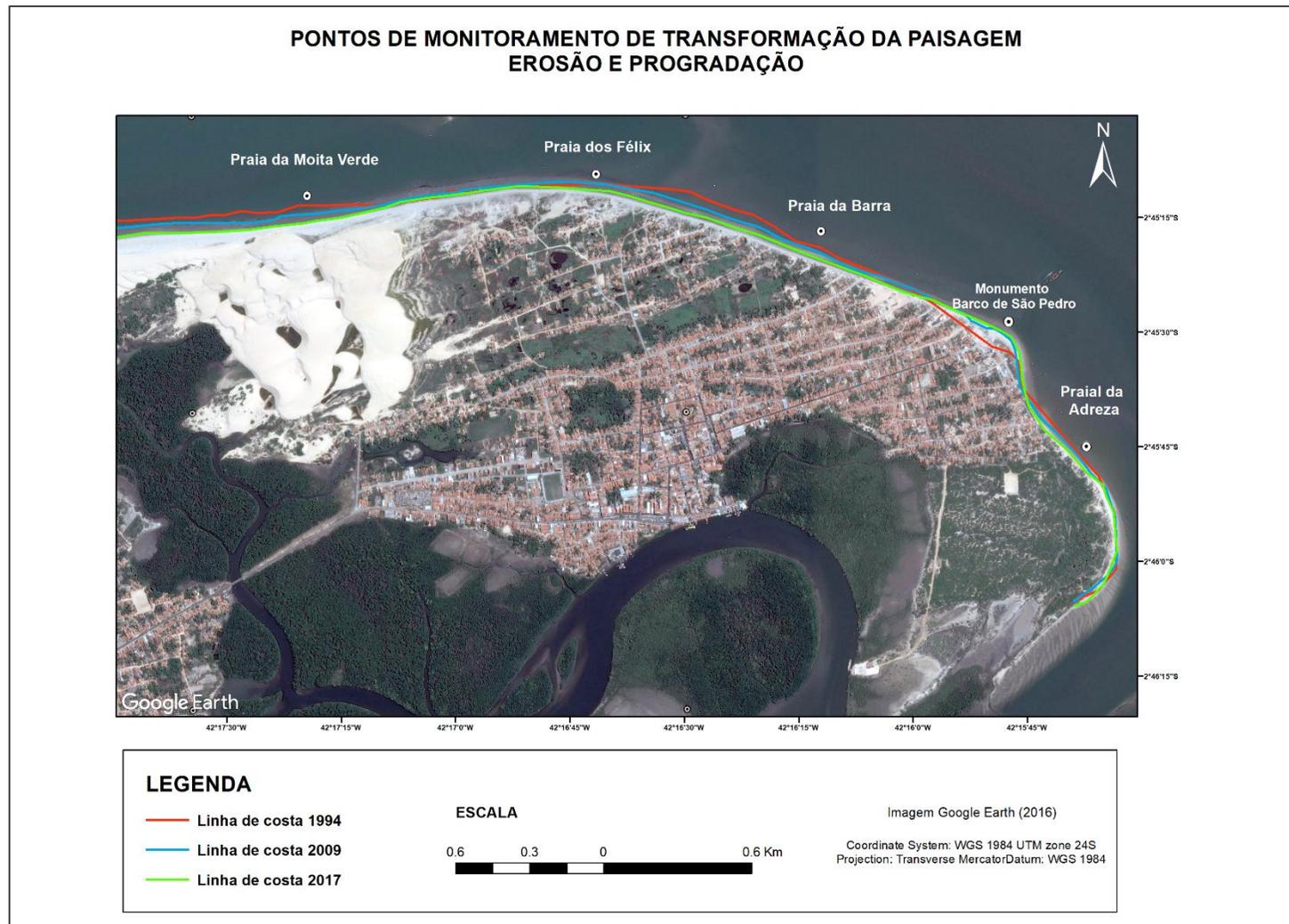


Figura 33: Pontos monitorados para vetorização da Linha de Costa no período de 1994 a 2017

No período de 1994 a 2009 a área erodida foi de 163,9m² apresentando a velocidade de 10,9m²/a, já no período de 2009 a 2017 a área erodida foi de 187,3m². Apesar das áreas erodidas em seus respectivos períodos não serem tão discrepantes uma da outra, é possível perceber que o processo erosivo teve uma maior intensidade no período de 2009 a 2017, onde apresentou a velocidade média de 23,3m²/a já que teve a maior área erodida em menor tempo (Tabela 9).

Tabela 9: Valores das áreas erodidas e progradadas, média de erosão e velocidade média para os períodos estudados.

PROGRADAÇÃO			
Ponto	1994-2009	2009-2017	
Monumento Barco de São Pedro	833m ²	-----	
EROSÃO			
Período	Área erodida (m ²)	Média de erosão (m ²)	Velocidade média (m ² /ano)
1994-2009	5.245m ²	163,9m ²	10,9
2009-2017	5.996m ²	187,3m ²	23,3

A erosão aqui verificada pode ser considerada uma erosão natural, por estar associada às causas naturais, com destaque aos eventos climáticos; não foi verificada nenhuma interferência nos rios que possa explicar a deficiência de aporte sedimentar como: atividades de agricultura, dragagem e mineração perto da praia ou atividades dentro d'água perto da praia.

Estudos Climáticos em todo mundo apontam que alteração climáticas podem ser, na maioria das vezes, as responsáveis por mudanças nas zonas costeiras. O tema foi estudado no âmbito da América Latina e Caribe por Reguero *et al.*, (2013); Izaguirre *et al.*, (2013) que como resultados de seus estudos analisando do comportamento de vento e onda através de retroanálise, os autores evidenciam uma tendência de aumento da altura média anual da onda e a elevação do Nível Relativo do Mar (NRM).

A elevação global do NRM está associada à expansão térmica dos oceanos e ao derretimento de geleiras, o que segundo o Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (2013) é um dos principais fatores da perda de terras costeiras causada pela ação de ondas, marés e correntes

Magrin *et al.*, 2014, ao analisar a condições climáticas e interferência no grau de vulnerabilidade das cidades costeiras no Atlântico sul concluiu que a frequência, intensidade e concentração de chuvas intensas têm aumentado nas

últimas décadas, estando diretamente relacionada ao fato do Brasil está submetido em maior ou menor grau a precipitações extremas e períodos secos, que podem estar associados à ocorrência de El Niño ou La Niña.

Os eventos meteorológicos-oceanográficos extremos, como ressacas e sobrelevações do NMM (marés meteorológicas positivas) geram elevada precipitação, dentre as suas principais consequências destacam-se: aumento da erosão costeira (Souza; 2010). E anomalias como a **TSM** que causa a escassez de chuvas e incidência maior de ventos na região NE, que amplificam os efeitos erosivos nas cidades costeiras, em especial quando ocorrem em fase de maré de sizígia, como é o caso da área de estudo em questão.

Retomando a caracterização da área de estudo, a configuração da praia é considerada por Santos (2008) como de estado dissipativo e que os sedimentos fluviais transportados em longas distâncias são depositados pelo mar nas praias adjacentes de acordo com a declividade da costa. As características oceanográficas de toda a região do Delta do Parnaíba têm os valores mais altos de maré na estação seca estão relacionados às velocidades dos ventos. Em caso de interferência climática, esses ventos ocasionam correntes costeiras mais fortes trazendo como consequência erosão e baixa deposição, conforme Paula (2013).

Após análise das características naturais da área de estudo, que ocorreu pode ser considerado produto da interação entre processos costeiros e condições meteorológicas e oceanográficas, que foram intensificados devido a maior incidência de ventos alísios devidos aos eventos de El Niño em 2009-10 (moderado) e 2015-16 (muito forte). A análise multitemporal das imagens de satélite permitiram a identificação do evento, mas ainda é necessário manter investigação de suas causas mais detalhadamente correlacionando dados climáticos e oceanográficos.

6.2. Análise da migração das dunas através da utilização de imagens de satélite

O litoral da área de estudo tem como característica principal a presença de feições eólicas altamente dinâmicas. No entanto, não existem trabalhos que descrevam este processo dinâmico e sua área de ocorrência. Neste sentido, uma análise multitemporal foi utilizada para medições indiretas de sua mobilidade. Foi possível descrever a dinâmica do campo de dunas móveis e a velocidade em que a migração ocorre, bem como as interações entre elementos dentro da paisagem e como estes mudaram ao longo do tempo.

A análise multitemporal das imagens Landsat permitiu delimitar o campo de dunas através da vetorização. Como resultado temos a figura 34 onde as linhas em vermelho representam a posição das dunas vetorizadas sobre a imagem de 1994 plotadas sobre uma imagem mais recente de 2017, onde é possível perceber visualmente a migração no sentido ENE-WSW.

Através da análise do mapa intitulado Migração das Dunas 1994 a 2017 (Figura 34), é possível verificar que os tipos de dunas predominantes são as Dunas Barcanas e Dunas transversais. As dunas Barcanas são formadas por ação de vento de apenas uma direção, como de fato ocorre na área de trabalho onde predomina a entrada de ventos de NE. Estes ventos se formam próximo às praias e se deslocam para o interior, tendo um deslocamento relativamente rápido. Já as dunas Transversais possuem menor taxa de deslocamento anual e são formadas pela ligação lateral de barcanas em lugares com maior volume de areia disponível.

6.2.1. Análise da migração das dunas na sede do Município de Tutóia

Aplicando a mesma metodologia, só que agora pontualmente nas dunas na sede do município de Tutóia (Figura 35), a área apresentou uma significativa progressão das formas Barcanas para formação de dunas Transversais no período de 1994 a 2017, tanto por conta da dinâmica natural costeira e como também por influência de alterações na ZCIT.

A área em questão apresenta uma concentração de residências onde muitos moradores já sofreram alguma perda ligada diretamente à mobilidade natural das dunas. Contudo, observa-se também que outros mais se encontram nesta zona de deslocamento, o que pode provocar no futuro prejuízos. A partir deste mapeamento foi possível extrair outras informações como velocidade média de deslocamento do campo de dunas e direção do deslocamento que serão apresentadas adiante.

6.2.2. Duna solitária

A duna Solitária se encontra na porção oeste do campo de dunas, numa área onde há poucos obstáculos e baixo aporte de sedimentos, o que explica sua forma barcana, e a torna um importante modelo para aplicação da metodologia utilizada no presente trabalho.

A sazonalidade acaba por controlar o deslocamento das dunas. A mobilidade deste tipo de dunas no litoral do Maranhão, de acordo com os estudos de Gonçalves (2003) e Santos (2008), ocorre devido aos aspectos climáticos da região, que durante o primeiro semestre do ano, a estação chuvosa permite a fixação das dunas fazendo com que haja pouca mobilidade. Já no período de estiagem que ocorre no segundo semestre, por conta do rebaixamento do lençol freático e do clima mais seco as dunas voltam a migrar.

Tal característica climática favorece ainda a formação de Esteiras de dunas (Figura 36), que são arcos parabólicos definidos na superfície do terreno, deixando registrado os ressaltos ou cavas que fornece uma simples leitura sobre o intervalo de tempo de migração das dunas (GONÇALVES, 2003).

Ao aplicar a metodologia proposta chegamos nos valores de deslocamento por período e a velocidade de deslocamento por ano (Tabela 10) onde, o período de 2001 a 2009 apresentou o maior deslocamento e maior velocidade chegando a 18,8m/ano.

O fato da duna ter se deslocado mais entre os anos 2001- 2009 pode ser explicado pela anomalia TSM que causa a escassez de chuvas e incidência maior de ventos na região NE. Essa anomalia ocorre junto aos eventos do El Niño, que nesse caso teve dois eventos moderados, um entre 2002-03 e outro entre 2009- 10, intercaladas com dois eventos de intensidade fraca, 2004-05 e 2006-07, enquanto no período de 1994-2001 houve apenas um registro desse evento de intensidade moderada, 1994-95, o que pode explicar o menor deslocamento dos períodos estudados. Nessas condições a escassez de chuva facilita a evaporação deixando os grãos mais secos, e a maior incidência de ventos favorece o transporte dos sedimentos.

Tabela 10: Valores de deslocamento e velocidade por período estudado.

Duna Solitária				
Período	1994-2001	2001-2009	2009-2017	1994-2017
Deslocamento em Metros	81,8m	150,7m	117,4m	349,9m
Velocidade (metros /ano)	11,6m/a	18,8m/a	14,6m/a	15m/a

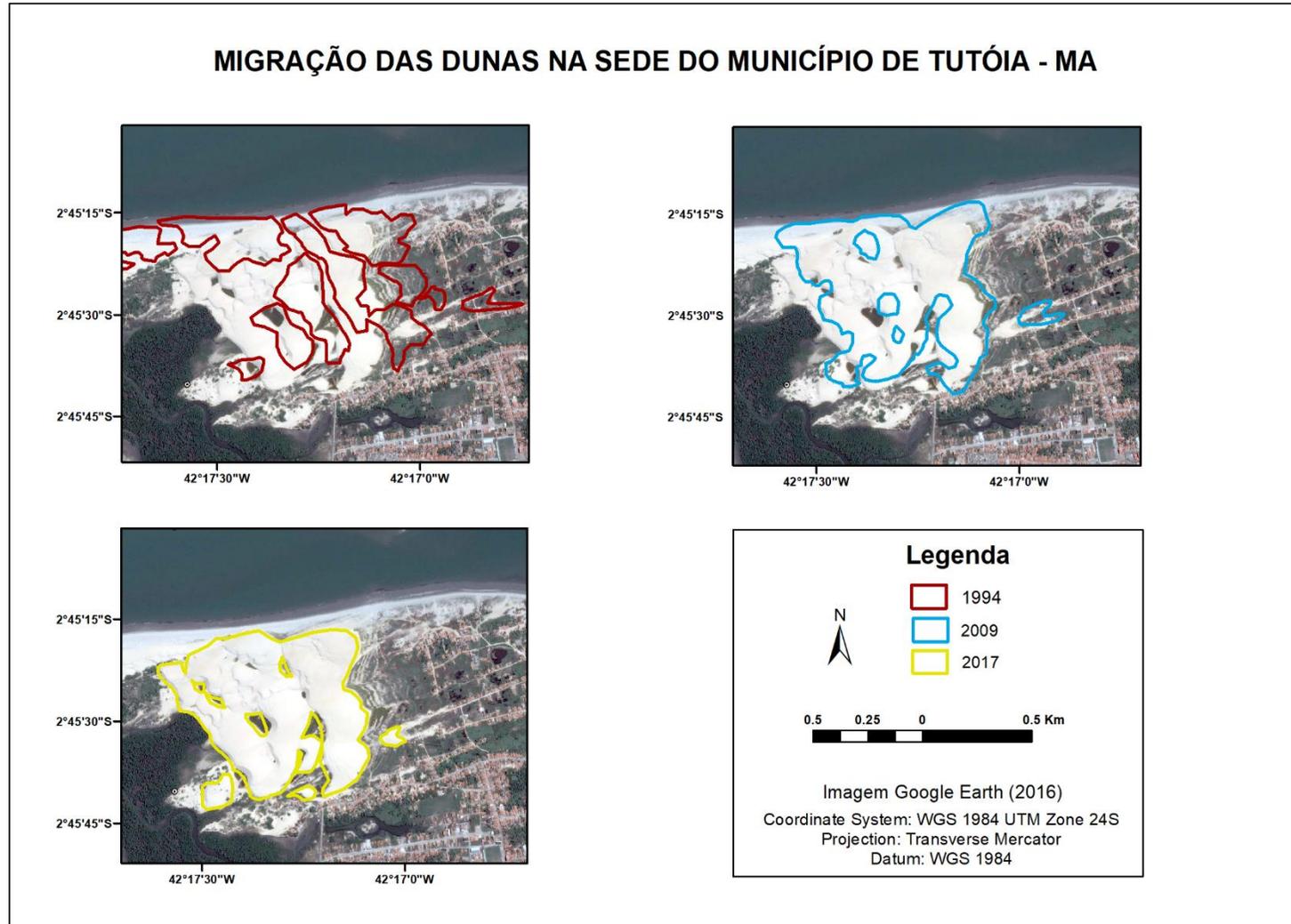


Figura 35: Migração das dunas na Sede do município de Tutóia

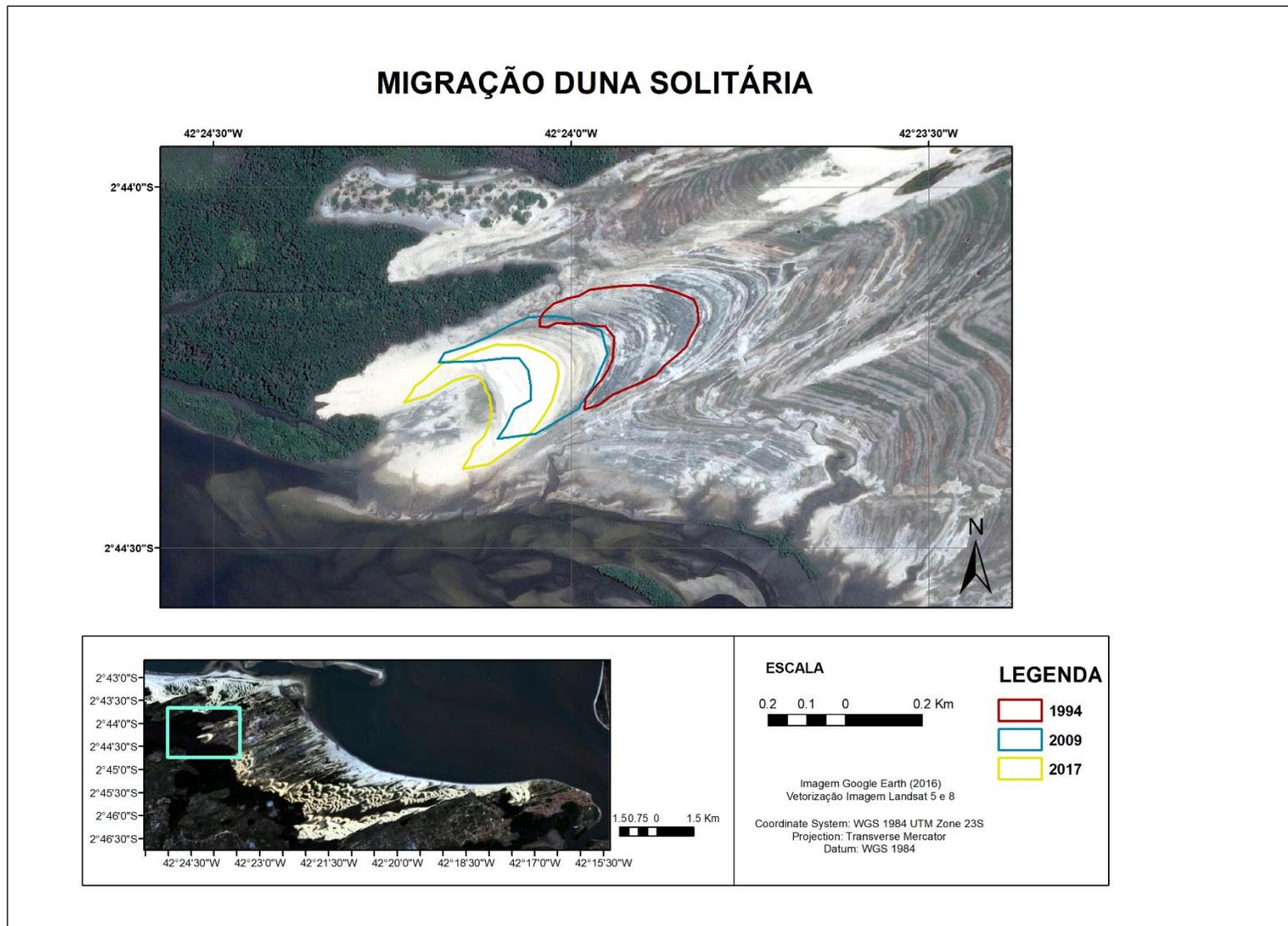


Figura 36: Deslocamento da Duna Solitária por período estudado

6.2.3.Duna 1 - sede do município

No bairro Cajueiro, encontra-se uma duna classificada como Parabólica que ao contrário das Barcanas, possui a cauda da duna voltada contra o vento (Figura 37). A presença de Dunas Parabólicas nessa região se justifica pela presença de um ambiente úmido e com vegetação, o que facilita a fixação na parte inferior, diminuindo o movimento da areia nas caudas.

Ao analisar os vetores para cada período e calcular o deslocamento, é possível verificar que a velocidade de deslocamento aumenta gradativamente tendo se deslocado 380,8m em 23 anos (Tabela 11).

Tabela 11: Valores de deslocamento e velocidade por período estudado.

Duna 1				
Período	1994-2001	2001-2009	2009-2017	1994-2017
Deslocamento em Metros	60,5m	146m	174,3m	380,8m
Velocidade (metros /ano)	8,6m/a	18,2m/a	21,7m/a	16,5m/a

Mesmo sendo perceptível a velocidade de deslocamento da duna, nos últimos 5 anos algumas residências (Figura 38) foram construídas bem próximas a ela e já apresentam sinais de comprometimento de suas estruturas mesmo não estando no caminho direto do deslocamento. Como exemplo temos a Residência 1 (Figura 39) que tem data de construção no ano de 2010 e que ficava a 118m de distância da duna e que hoje encontra-se comprometida, por conta de soterramento; por ter sido construída na rota de deslocamento da duna que segue a direção ENE-WSW.

Meireles *et al.* (2018) ao estudar os Campos de dunas em Jericoacoara ressaltou necessidade de ampliar a investigação com a definição de alterações setoriais na temperatura da água do mar, relacionadas às conexões continente-oceano-atmosfera, pois há evidência de mudanças de alta frequência nos níveis relativos do mar, que estão ligadas às alterações abruptas e cíclicas na temperatura dos oceanos, o que está influenciando as intensidades dos elementos oceanográficos no NE brasileiro.

A aceleração do deslocamento no período 2009 – 2017 coincide com o evento do El Niño do período de 2015-16 (Tabela 4) que causa escassez de chuvas e intensificação dos ventos. Além dos fatores climáticos, o aumento

constante da velocidade de deslocamento da referida duna se deve à diminuição da vegetação da área.

A restinga, os arbustos e pequenas árvores típicas da região diminuíram na última década, de acordo com os próprios moradores. O aumento do número de residências no local levou a retirada da vegetação tanto para a construção quanto para abertura de ruas, deixando o solo exposto e livre de qualquer barreira que impedisse ou diminuísse a migração da duna.

A vegetação nativa litorânea desempenha importante papel na formação e fixação das dunas, são adaptadas às condições ambientais extremas como salinidade, atrito dos grãos e movimentos de areia. Segundo Pinheiro (2009), a vegetação pode ter relação direta com a morfologia das dunas, é responsável pela fixação de um revestimento pioneiro, o qual detém ou atenua os efeitos da dinâmica eólica, responsável pela migração. (PINHEIRO, 2009; ARAÚJO *et al.*, 2016).

A exemplo das intervenções antrópicas, Araújo *et al.* (2016) afirma que as dunas da Praia de São Marcos em São Luís constituem um ambiente bastante modificado, onde a vegetação de restinga deu lugar a grandes construções. A especulação imobiliária a implantação e ampliação da avenida ao longo da orla marítima também ocasionou grande perda da vegetação de dunas o que faz com que os sedimentos sejam transportados com maior velocidade, não sejam fixados e invadam ruas e avenidas.

A retirada da vegetação de dunas, além de modificar a forma das dunas, estas são importantes para evidenciar abordagens integradas da paisagem, provisão de habitats e fornecem sedimentos que auxiliam no controle da erosão costeira (MONTREUIL e BULLARD, 2011; Meireles *et al.*, 2018).

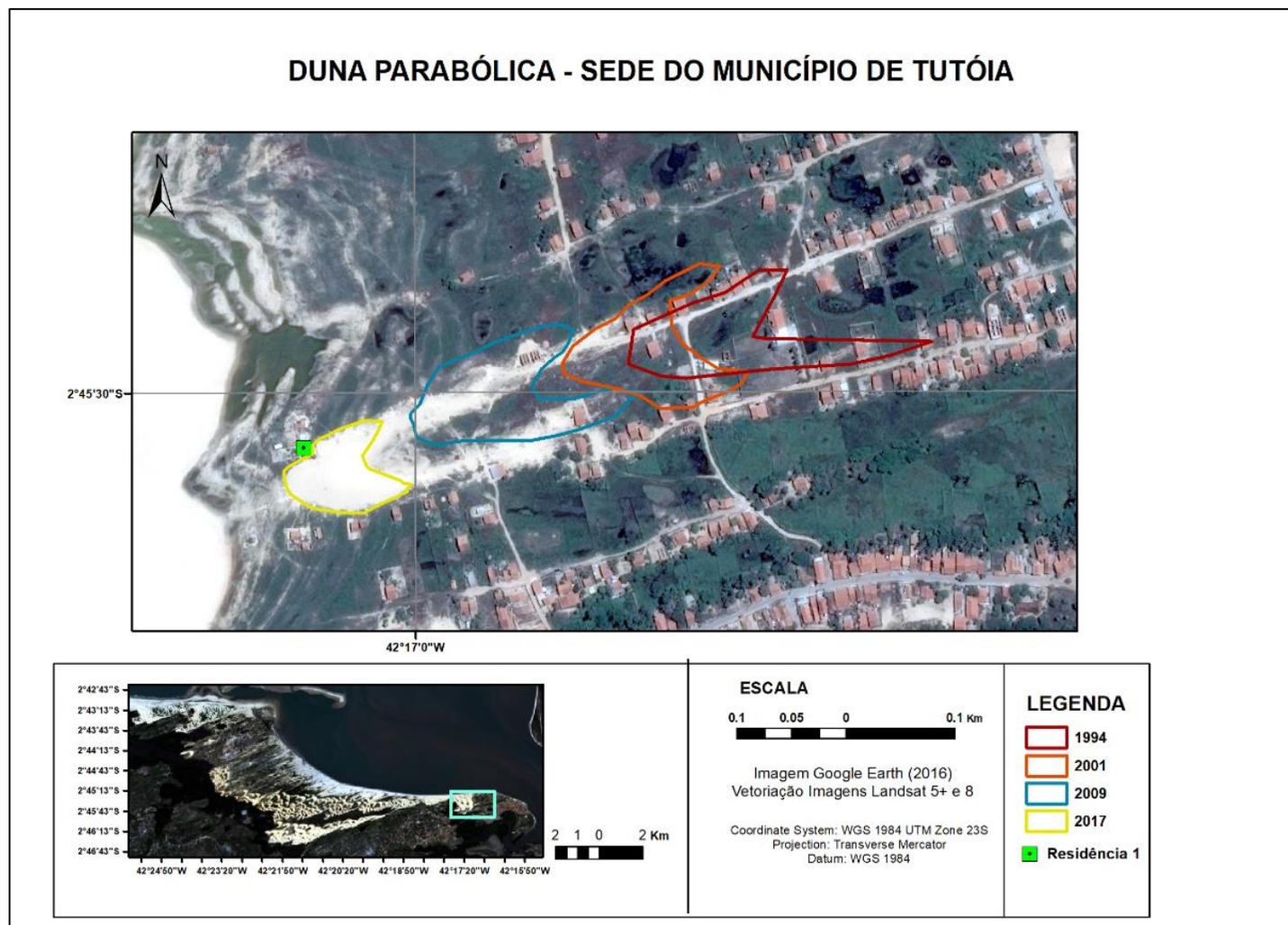


Figura 37: Deslocamento de Duna Parabólica (Duna 1) na sede do município



Figura 38: Residência construída nos últimos 4 anos que já apresenta interferências causadas pelo deslocamento da Duna Parabólica – Janeiro de 2017



Figura 39: Residência comprometida pelo avanço da Duna Parabólica - Janeiro de 2017

6.2.4.Duna 2 – Bairro Cajueiro

A duna denominada de 2 pode ser classificada como Barcana em formação, por ter forma aproximada de “meia lua” e se encontrar isolada. Através da análise temporal é possível perceber que a mesma foi desmembrada naturalmente de dunas Transversais no período de 2009 a 2017 (Figura 41).

A velocidade média de deslocamento no período de 1994 a 2001 era de 14,7m/ano. Observou-se uma queda no período seguinte de 2001 a 2009 para 10,6m/ano por conta do desmembramento da duna, mas que voltou a subir no período posterior com uma média ainda maior que a primeira de 18,2m/ano (Tabela 12).

Tabela 12 :Valores de deslocamento e velocidade por período estudado.

Duna 2				
Período	1994-2001	2001-2009	2009-2017	1994-2017
Deslocamento em Metros	103,3m	85.1m	146m	334,4m
Velocidade (metros /ano)	14,7m/a	10,6m/a	18,2m/a	14,5m/a

Através da pesquisa de campo foram identificadas residências já comprometidas, como a Residência 2 (Figura 42) que em 2005 ficava aproximadamente 200m distante da Duna 2 e que no mês de Janeiro de 2017 ficava a menos de 1m. Outra informação obtida em campo é que a Duna 2, que foi desmembrada, se encontra exatamente onde existia a Residência 3 que foi totalmente encoberta no ano de 2014. O desmembramento pode estar associado aos obstáculos (árvores) encontrados por grande parte da duna, que fez com que somente uma parcela migrasse e se depositasse mais à frente sobre a Residência 3, onde se aglutinou aumentando sua altitude rapidamente entre os anos de 2016 e 2017 conforme ao que foi visto em campo durante as pesquisas.

A Residência 4 (Figura 43) está sendo comprometida pela parte dos fundos, e ainda não sofreu danos maiores por conta da construção de cercas para diminuir a velocidade, mas se encontra exatamente no eixo de deslocamento ENE-WSW.

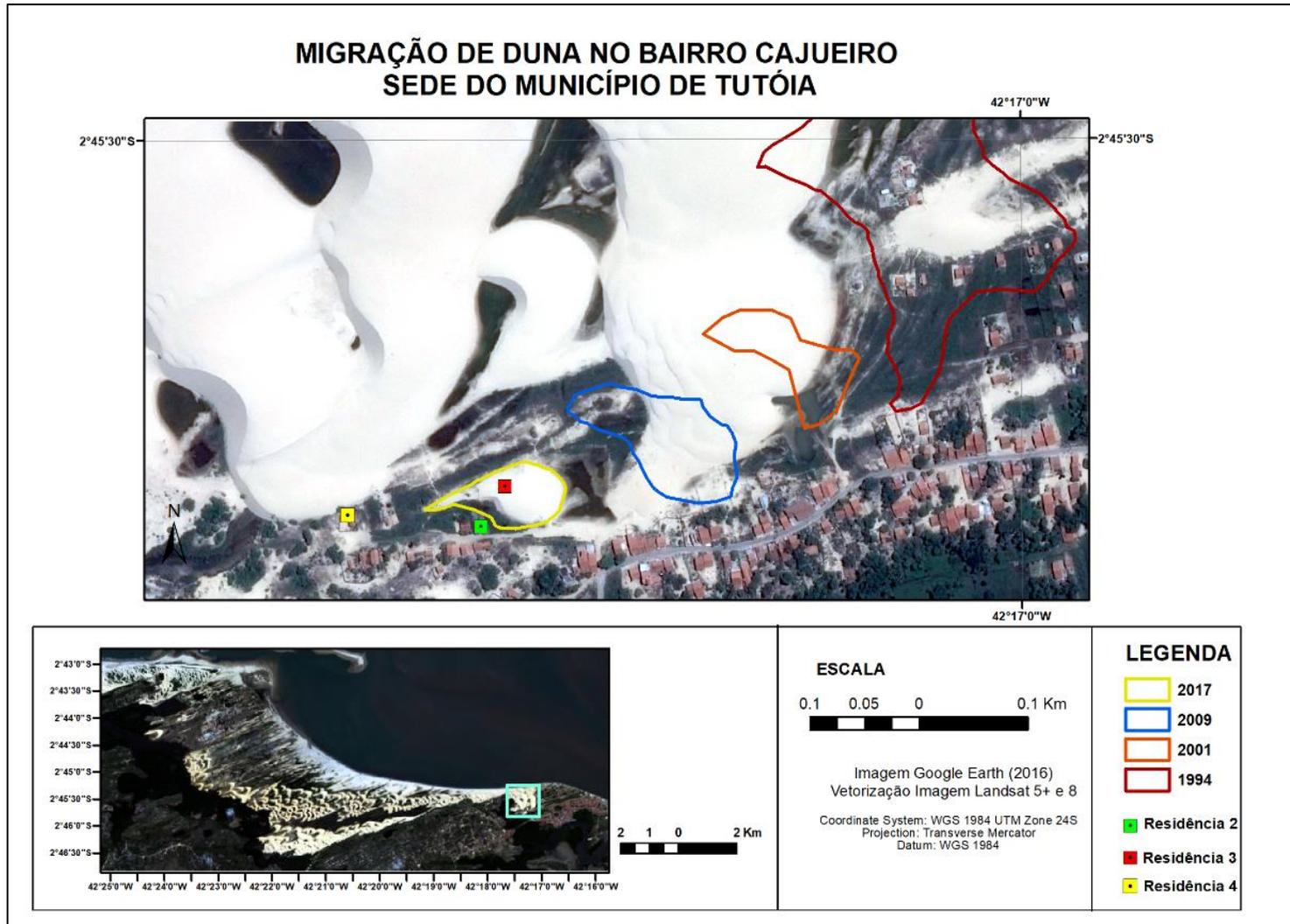


Figura 40: Migração de duna no bairro Cajueiro



Figura 41:Residência 2 já comprometida pelo avanço da duna



Figura 42:Residência 4, sofrendo influência pelos fundos da residência.

Partindo do pressuposto da velocidade do último período (18,2m/a) ser mantida, as residências que se encontram a oeste (Figura 41) que estão a 152m de distância das dunas estarão todas afetadas em cerca de 8 anos. Isso mostra que apesar das Imagens Landsat não apresentarem alta resolução, são eficientes em análises multitemporais, assim como na caracterização de processos naturais e determinação de estimativas de evolução da paisagem.

O salto na velocidade de migração no último período pode ter relação com o evento do El Niño do período de 2015-16 (Tabela 4) que se influencia diretamente nas anomalias da TSM, ao elevar a temperatura da superfície do

mar fazendo com que haja escassez de chuvas (Figura 40) e incidência de ventos com intensidade maior no segundo semestre (MENEZES *et al.*, 2008; CHAVES, 2011).

Segundo os autores a predominância dos ventos na região é de sentido NE-SW, possuindo algumas variações ao longo do ano por conta da influência da ZCIT que ao se encontrar no Hemisfério Norte, no período de Maio a Junho, ocasionando os ventos direção E-W. A ZCIT começa a regressar em Julho para o Hemisfério Sul, dando início ao período de estiagem chegando em sua posição máxima nesse hemisfério no mês de Outubro. Nesse período é que ocorre a maior incidência de ventos fortes de ENE-WSW na área de estudo e o aumento do transporte eólico.

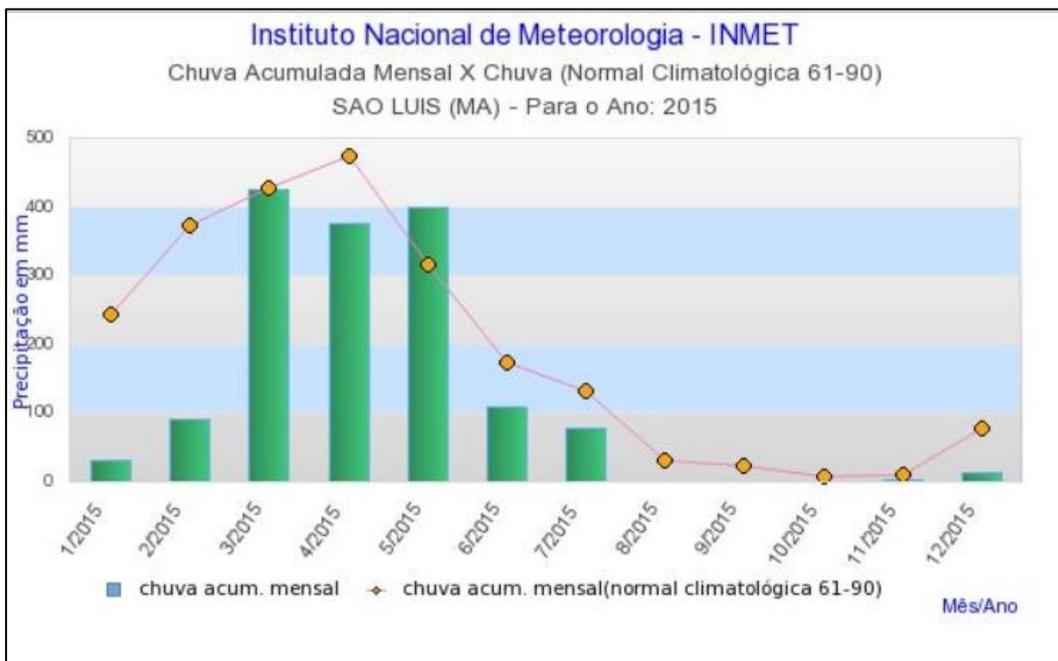


Figura 43: Distribuição de chuvas no ano de 2015.

Fonte: CEPTEC/INMET

7. Considerações Finais

O conhecimento das características ambientais associado à utilização das técnicas de geoprocessamento forma um excelente conjunto para a análise da evolução morfodinâmica costeira. No litoral de Tutóia tornou perceptível a erosão da costa, mesmo que em velocidade pequena, além de permitir identificar aspectos importantes sobre a dinâmica do campo de dunas, mostrando-se assim uma ferramenta essencial para a produção de informações em ambientes costeiros.

A análise e comparação de imagens de 1994 a 2017, possibilitou constatar mudanças significativas nos aspectos fisiográficos locais. As imagens multiespectrais Landsat 5TM e 8 se mostraram eficientes e bastante úteis para análises em séries temporais, principalmente por possibilitar a sobreposição de imagens e o cruzamento dos polígonos dos diferentes anos e sem custos pois sua disponibilização é gratuita.

Mesmo possuindo resolução espacial de 30m, os mapas resultantes permitiram caracterizar os processos dominantes ao longo da linha de costa identificando áreas de erosão e progradação, bem como permitiram espacializar a mobilidade dos campos de dunas, tais informações são importantes principalmente em uma área com completa carência de informações a este respeito. Essas informações, somadas a novos levantamentos, poderão subsidiar futuros projetos de planejamento ambiental e urbano na tentativa de minimizar o impacto sobre a população residente na área de estudo.

Estudos sobre intensificação das mudanças climáticas chamam atenção aos possíveis perigos naturais que ameaçam ambientes costeiros, e segundo o PBMC (2013), alguns deles podem ser amplificados como: movimentação de dunas, secas, extremos de temperatura e epidemias (doenças de veiculação hídrica e aérea). Mudanças climáticas estão associadas a elevação do Nível Relativo do Mar em cidades costeiras, particularmente em cidades do Norte e Nordeste, como relatado por Souza (2010), assim como o El Niño e La Niña que estão associados às mudanças nos regimes pluviométricos e regime de ventos.

Dessa forma, os dados do período de 2009 a 2017, que apresentou as mudanças mais significativas observadas, podem estar associadas ao El Niño de

2009 – 10, de intensidade moderada e o de 2015-16 de intensidade forte. A precipitação desse período ficou abaixo da média, o que dificultou a fixação das dunas diante da maior velocidade dos ventos e do clima mais seco, como consequência temos uma migração maior de sedimento em menos tempo.

Provavelmente, o fato deste evento interferir na quantidade de precipitação pode ter diminuído a carga sedimentar transportada pelo rio e que chega até a linha de costa, facilitando a erosão, já que o suprimento de sedimentos foi abaixo do que a retirada. Contudo uma investigação mais detalhada a partir de uma série histórica mais ampla é necessária para identificar se o processo erosivo mapeado é uma tendência ou não nesta região.

Os resultados alcançados auxiliaram na compreensão da dinâmica costeira do município de Tutóia e evidenciam a necessidade de ampliar a investigação e o monitoramento sistemático dessas feições, produzindo novos dados afim de associar à dinâmica regional e global dos componentes meteorológicos, enfocando possíveis interferências das mudanças climáticas na dinâmica e evolução da paisagem costeira.

Os dados demonstram que a necessidade de medidas de Políticas Públicas, como o cumprimento das regras e plano de ação propostas no Plano de diretor e do documento do Plano de Gestão da APA do Delta do Parnaíba, buscando a aproximação com a população residente local. Zee (2008) sugere que zonas costeiras podem ser adaptadas para reduzir os riscos de extremos climáticos, como elevação do NMM e as suas consequências, com a adoção de políticas preventivas e reativas.

Para aumentar a resiliência das comunidades costeiras, os formuladores de políticas precisam entender as opções de adaptação e os obstáculos para implementá-las. Buscando identificar quais as principais áreas de maior dinâmica, e direcionar o crescimento da cidade também levando em consideração as práticas socioeconômicas da comunidade em questão.

Incentivar ao maior acesso à informação sobre os possíveis riscos locais por parte da comunidade, e sua participação em projetos gestão e habitações, devem ser consideradas como meio de que fazer os moradores e o governo atuem juntos no processo de gestão da área, e auxiliar nas tomadas de decisões no processo de ocupação.

As políticas de desenvolvimento urbano, baseadas em avaliações de risco, podem estar entre os meios mais efetivos de adaptação às mudanças do ambiente, sobretudo por intermédio de uma abordagem sistêmica que trata de problemas atuais, ao mesmo tempo em que antecipa problemas futuros.

Considerando assim, a extrema importância dar continuidade na investigação, pesquisa, e monitoramento da dinâmica costeira e seus processos para que qualquer medida seja norteada para manutenção do equilíbrio entre as exigências naturais e ecológicas com as demandas socioculturais e econômicas.

8. Referências bibliográficas

AB'SABER, A. N. **Megageomorfologia do Território Brasileiro**. In: CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. (Orgs.) Geomorfologia do Brasil. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 1998. p. 71-106.

ALMEIDA, A. S.; WERNECK, G. L.; RESENDES, A. P. C. **Classificação orientada a objeto de imagens de sensoriamento remoto em estudos epidemiológicos sobre leishmaniose visceral em área urbana**. Cadernos de Saúde Pública, v. 30, p. 1639-1653, 2014.

ARAUJO, A. C. M.; SILVA, A. N. F.; ALMEIDA JR, E. B. **Caracterização estrutural e status de conservação do estrato herbáceo de dunas da Praia de São Marcos, Maranhão, Brasil**. Acta Amazônica, v. 46, 2016.

ARAÚJO, T. D. **Análise espaço-temporal dos Lençóis Maranhenses com o uso de imagens de satélite para o planejamento ambiental**. 2015. Dissertação de Mestrado, UFRS. Porto Alegre, 2015.

ARDON, Karin; TSOAR, Haim; BLUMBERG, Dan G. **Dynamics of nebkhas superimposed on a parabolic dune and their effect on the dune dynamics**. Journal of Arid Environments, v. 73, n. 11, p. 1014-1022, 2009.

ARONOFF, S. **Geographical Information Systems: A Management Perspective**. Ottawa, WDI Publications, 1989

BERTRAND, G. **Paisagem e geografia física global. Esboço metodológico**. In: Raega-O Espaço Geográfico em Análise, v. 8, p. 141-152. Editora UFPR, 2004.

BRANCO, M.P.N.C.; LEHUGEUR, L.G.O.; CAMPOS, J.E.G. **Proposta de classificação para as feições eólicas do setor leste da região metropolitana de Fortaleza- Ceará- Brasil**. Geociências, UNESP, São Paulo, v. 22, n. 2, p. 163 – 174, 2003

BRASIL. Decreto de 28 de agosto de 1996. Dispõe sobre a criação da **Área de Proteção Ambiental Delta do Parnaíba**, nos Estados do Piauí, Maranhão, e Ceará, e dá outras providências, 1996.

BRASIL. Resolução 1 de 21/11/1990. Ministério do Meio Ambiente. Comissão Interministerial Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM). Brasília, 1990

- BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R.A. **Principles of geographical information systems**. Oxford, Oxford University Press, 1998.
- CÂMARA, G. **Geoprocessamento para projetos ambientais**. INPE, 1996.
- CÂMARA, G; DAVIS, C. **Introdução ao geoprocessamento**. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPECIAIS–INPE. Fundamentos de Geoprocessamento. São José dos Campos, v. 1, p. 1-5, 2001.
- CARVALHO, M. A. V. OYAMA, M. D. **Variabilidade da Largura e Intensidade da Zona de Convergência Intertropical Atlântica: Aspectos Observacionais**. Revista Brasileira de Meteorologia, v.28, n.3, 305 - 316, 2013.
- CARRETERO, Silvina *et al.* **Temporal analysis of the changes in the sand-dune barrier in the Buenos Aires Province, Argentina, and their relationship with the water resources**. Applied Geography, v. 54, p. 169-181, 2014.
- CHAVES, R. R. **Conexões entre a TSM do Atlântico Sul e a convecção de verão sobre a América do Sul: análise observacional**. Revista Brasileira de Geofísica, v. 29, n. 1, p. 5-20, 2011.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2 ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1980.
- _____ **Geomorfologia Fluvial: o canal fluvial**. v.1, 1.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1981.
- CORRÊA, J. A. M. **Aspectos diagnéticos dos arenitos bom gosto: área leste da Bacia de barreirinhas (MA)**. Programa de Pós Graduação em Geociências – UFPA. Belém, 1986
- COWEN, D.J. GIS versus CAD versus DBMS: what are the differences. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 54:1551-4, 1988.
- Crósta, A. P. 1992. **Processamento digital de imagem de sensoriamento remoto**. - ed.rev. – Campinas, SP, IG/UNICAMP, 4ª reimpressão. 170p.
- DA SILVA, R. P.; DE OLIVEIRA MARTINS, A. V.; DE ARAÚJO, P. C. **A utilização do geoprocessamento e da cartografia nos estudos agropecuários: um estudo de caso para a Região Metropolitana de Natal**. Sociedade e Território, v. 26, n. 2, p. 92-108, 2014.
- DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS, Painel Brasileiro. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Sumário Executivo GT1**. Rio de Janeiro: PBMC, 2013.
- DIAS, J. L.; DE BRITO, J. I. B. **Posições do Cavado Equatorial e da Faixa de Máxima Tsm no Atlântico Tropical**. In: Anais III Workshop Internacional sobre água no Semiárido Brasileiro. Volume 1, 2017

DOMÍNGUEZ J.M.L. **A zona costeira do Brasil**. Em: Dillenburg SR, Hesp PA (eds) *Geologia e geomorfologia das barreiras costeiras do holoceno do Brasil*. Springer, Berlin, p 17–51. 2009.

FEIJÓ, F. J. **Bacia de Barreirinhas**. Rio de Janeiro: Boletim de Geociências da PETROBRÁS, n. 1, v. 8, p. 103-109, 1994. FEIJÓ, F. J. *Bacia de Barreirinhas*. Rio de Janeiro: Boletim de Geociências da PETROBRÁS, n. 1, v. 8, p. 103-109, 1994.

FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo: Oficina de textos, 2008.

GIANNINI, P. C. F.; ASSINE, M. L.; BARBOSA, L. M.; BARRETO, A.M. F.; CARVALHO, A. M.; CLAUDINO-SALES, V.; MAIA, L. P.; MARTINHO, C. T. ; PEULVAST, J.P. ; SAWAKUCHI, A. O. ; TOMAZELLI, L. J. **Dunas e Paleodunas Eólicas Costeiras e Interiores**. In: SOUZA, C. R. de. G.; SUGUIO, K.; OLIVEIRA, A M. dos S.; OLIVEIRA, P. E. de. (Orgs.) *Quaternário do Brasil*. São Paulo: Holos Editora, p. 235-257, 2005.

GIRARD, E. P. **Atlas da questão agrária brasileira: uma análise dos problemas agrários através do mapa**. In *Anais do IV Simpósio Internacional de Geografia Agrária/ V Simpósio Nacional de Geografia Agrária*. 2009.

GONÇALVES, R. A. **Contribuição ao mapeamento geológico e geomorfológico dos depósitos eólicos da planície costeira do Maranhão: região de Barreirinhas e Rio Novo Lençóis Maranhenses-MA-Brasil**. Rio Grande do Sul: UFRGS, 1997. 235p. (Tese de Doutorado).

GONÇALVES, R.A *et al.* **CLASSIFICAÇÃO DAS FEIÇÕES EÓLICAS DOS LENÇÓIS MARANHENSES-MARANHÃO-BRASIL**. *Revista Mercator*, v. 2, n. 3, 2003.

GONÇALVES, R.A; SANTOS J. H.S; J. W. A.CASTRO. **O papel da Dinâmica costeira no controle dos campos de dunas eólicas do setor leste da planície costeira do Maranhão - Lençóis Maranhenses**. In: X Congresso Brasileiro da ABEQUA, Guarapari- ES, 2005.

HOFF, R.; LEITE, J. C.; ZOUAIN, RNA. **Aplicação de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento como apoio a estudos geológicos e geotécnicos para gestão ambiental do município de três cachoeiras, litoral Norte do RS, Brasil**. *Embrapa Uva e Vinho-Artigo em periódico indexado* , 2010.

IZAGUIRRE, Cristina *et al.* **Extreme wave climate changes in Central-South America**. *Climatic change*, v. 119, n. 2, p. 277-290, 2013.

JEFFERSON, A. J.; WEGMANN, K. W.; CHIN, A. **Geomorphology of the Anthropocene: Understanding the surficial legacy of past and present human activities**. *Anthropocene*, n. 2, p. 1-3, 2013.

LINS, R. C. **Bacia do Parnaíba: aspectos fisiográficos. Estudo do quadro natural**. Ministério da Educação e Cultura, Instituto Joaquim Nabuco de Pesquisas Sociais, 1978.

LOUZEIRO, A. S. e FEITOSA, A. C. **Diagnóstico do município de Tutóia - MA frente ao processo de planejamento e Gestão**. Monografia apresentada ao curso de Geografia da Universidade Federal do Maranhão. São Luís, 2016. 76p.

LUIJENDIJK, A. *et al.* **The State of the World's Beaches**. *Scientific reports*, v. 8, 2018.

KOMAR, P.D. **Handbook of coastal processes and erosion**. fl: CRC Press: 1-20. 1983.

MAGINI, C; MARTINS, A. H. O.; DA SILVA PITOMBEIRA, E. **A Infraestrutura Portuária e Suas Influências na Sedimentação Costeira na Vila do Pecém, Ceará, Brasil**. *Geociências (São Paulo)*, v. 32, n. 3, p. 532-546, 2013.

MAGRIN, G. O. *et al.* Central and South America. **Climate change**, p. 1499-1566, 2014.

MALLMANN, D. *et al.* **Classificação morfodinâmica das praias arenosas de Ipojuca (Pernambuco, Brasil) através da análise semântica de imagens de satélite pancromáticas**. *Pesquisas em Geociências, UFRGS*. Porto Alegre- RS v. 41, n. 2, p. 169-189, 2014.

MMA. **Zoneamento Ecológico-Econômico do Baixo Rio Parnaíba**: Subsídios técnicos, Relatório Final. - Brasília, 2002

MARANHÃO. **Zoneamento Costeiro do Estado do Maranhão**. Fundação Sossândrade de Apoio e Desenvolvimento da Universidade Federal do Maranhão. /IICA/ GEAGRO/LABOHIDRO. 242p. 2003.

MARINO, Márcia Thelma Rios Donato; FREIRE, George Satander Sá. **Análise da evolução da linha de costa entre as Praias do Futuro e Porto das Dunas, Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), estado do Ceará, Brasil**. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, v. 13, n. 1, p. 113-129, 2013.

MARQUES, F. **As praias perdidas: Erosão e recuo do mar redesenam o litoral brasileiro**. *Revista Pesquisa FAPESP Online*. Edição Impressa 92-Outubro, 2003.

MARTIN, L.; SUGUIO, K.; FLEXOR, J. M. **As flutuações de nível do mar durante o quaternário superior e a evolução geológica de " deltas" brasileiros**. *Boletim IG-USP. Publicação Especial*, n. 15, p. 01-186, 1993.

MARTINS, I. **Introdução ao Sistema de Geoprocessamento**. Biblioteca Cultura, 2009.

MASSELINK, G., SHORT, A. D. **The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology – a conceptual beach model**. Journal of Coast Research. n. 9. p. 785-800; 1993.

MEIRELES, A. J. A. **Geodinâmica dos campos de dunas móveis de Jericoacoara/CE-BR**. Mercator-Revista de Geografia da UFC, v. 10, n. 22, 2011.

MEIRELES, A. J. *et al.* **Campos de dunas em Jericoacoara: intervenções humanas como possível indicador de mudança na dinâmica morfológica**. Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasileira de geografia, n. 34, 2018.

MENEZES, H. E. A.; DE BRITO, J. I. B.; DOS SANTOS C. A. C.; DA SILVA, L. L. **A relação entre a temperatura da superfície dos oceanos tropicais e a duração dos veranicos no Estado da Paraíba**. In: Revista brasileira de meteorologia. vol.23. nº2. São Paulo,2008.

MOLION, Luiz Carlos Baldicero; BERNARDO, S. de O. **Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 17, n. 1, p. 1334-1342, 2002.

MORAIS, J. O. **Processos e Impactos Ambientais em Zonas Costeiras - Geologia do Planejamento Ambiental**. Rev. Geol. Fortaleza-Ce. V.9, p. 191-242, (1996).

MUEHE, D. **Geomorfologia Costeira**. In: GUERRA, A.J.T. e CUNHA, S.B. (Orgs.). Geomorfologia uma atualização de bases e conceitos. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil. p. 253-308. 1994.

MUEHE, D. **Critérios morfodinâmicos para o estabelecimento de limites da orla costeira para fins de gerenciamento**. Revista brasileira de geomorfologia, v. 2, n. 1, 2001.

MUEHE, D. C. E. H. *et al.* **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, v. 1, p. 475, 2006.

MUEHE, D. **Erosão costeira-Tendência ou eventos extremos? O litoral entre Rio de Janeiro e Cabo Frio, Brasil**. Revista de Gestão Costeira Integrada- Journal of Integrated Coastal Zone Management, v. 11, n. 3, 2011.

NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Edgar Blucher. 308p. 1992.

- PAULA, J.E.A. **Dinâmica Morfológica da Planície Costeira do estado Do Piauí: Evolução, Comportamento dos Processos Costeiros e a Variação da Linha De Costa**. 243p. Tese de Doutorado – UFC, Fortaleza – CE, 2013.
- PAULA, J.E.A.; MORAIS J.O.M.; BAPTISTA, E.M.C; GOMES, M.L; PINHEIRO, L.S. **Piauí Beach Systems**. In: *Brazilian Beach Systems*. Springer, 153-174, p. 2016.
- PEREIRA, L. C. C.; TRINDADE, W. N; DA SILVA, I. R.; VILA-CONCEJO, A. e SHORT, A. D. **Maranhão Beach Systems, Including the Human Impact on São Luís Beaches**. In: *Brazilian Beach Systems*. Springer, 125-152 p. 2016.
- Potter C, Weigand J (2016) **Analysis of Desert Sand Dune Migration Patterns from Landsat Image Time Series for The Southern California Desert**. *J Remote Sensing & GIS* 5: 164
- PINHEIRO, M. V. A. **Evolução Geoambiental e Geohistórica das Dunas Costeiras de Fortaleza, Ceará. Dissertação (Mestrado em Geografia)**. Universidade Federal do Ceará, 2009. Fortaleza, 2009.
- PYE, K. TSOAR, H. **Aeolian sand and sand dunes**. Springer Science & Business Media, 2008.
- REGUERO, B. G.; MÉNDEZ, F. J.; LOSADA, I. J. Variability of multivariate wave climate in Latin America and the Caribbean. **Global and Planetary Change**, v. 100, p. 70-84, 2013.
- ROSA, R. **Introdução ao Geoprocessamento**. Universidade Federal de Uberlândia – MG.142 p. 2013
- SANTANA, W. S. C. **Análise-multitemporal da paisagem, potencialidades e fragilidades sob a ótica do uso e ocupação: destaque para as terras da Alta Bacia do Rio Taboco-MS**. Tese de Doutorado- Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2015.
- SANTOS, J.H.S. **Análise por Geoprocessamento da Ocupação na Franja Costeira ao Norte da Cidade de São Luís – MA**. Dissertação de Mestrado, UFRJ, p 149. 1996.
- SANTOS, J. H.S.; CASTRO, J.W. A.C.; GOLÇALVES, R.A; SANTOS, N.F.B. **Modelo Evolutivo do Campo de Dunas do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses – Ma/ Brasil**. Anais do Congresso da ABEQUA, 2005
- SANTOS, J. H. S. **Lençóis Maranhenses Atuais e Pretéritos: um tratamento espacial**. 250 p. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Geografia – UERJ, Rio de Janeiro, 2008.
- SANTOS, R.A. **Processos de Erosão e Progradação entre as praias de Atafona e Grussaí – RJ**. 48p. Monografia – UFF, Niterói –RJ, 2006.

- SILVA, C. V. F. **Planejamento do uso e ocupação do solo urbano integrado ao mapeamento de áreas com risco de inundação**. 166p. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2013
- SCHERER, M. **Gestão de praias no Brasil: Subsídios para uma reflexão**. In: Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management, v. 13, n. 1, 2013.
- SHORT, A. D.; KLEIN, A. H. F. (Orgs.). **Brazilian Beach Systems**. Springer, 2016.
- SOAVINSKI, R. J. **Plano de Gestão e Diagnóstico Geoambiental e socioeconômico da APA do Delta do Parnaíba**. Instituto de Estudos e Pesquisas Sociais da UECE-IEPS, 1998. 98p. SOTCHAVA, V. B. O Estudo de Geossistemas. Instituto de Geografia. USP, São Paulo: Ed. Lunar, 1977.
- Souza, CRG (2010) **Brazilian scientific programs in natural disasters**. In: IDRC Davos 2010 - International Disaster and Risk Conference, Davos (Suíça), 30/05 a 03/06/2010, Extended Abstracts (e-book), p.697-700.
- SOUZA, U. D. V. **Dinâmica da paisagem da área do povoado de Ponta do Mangue, município de Barreirinhas – Maranhão**. 70p. Monografia – UFMA, São Luís – MA, 2007.
- SUGUIO, K. **Geologia do Quaternário e Mudanças Ambientais: (passado + presente = futuro?)** São Paulo: Paulo's Comunicação e Artes Gráficas. (2001).
- TESSLER, M. G.; GOYA, S. C. **Processos costeiros condicionantes do litoral brasileiro**. Revista do Departamento de Geografia, v. 17, p. 11-23, 2011
- TROSDTORF JUNIOR, Ivo *et al.* **Bacia de Barreirinhas**. Bol. Geociências Petrobrás, Rio Janeiro-RJ. v. 15, n. 2, p. 357-369, 2007.
- TUTÓIA. **Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano de Tutóia**. LEI No117 /2006 – GB. - DE 05 DE OUTUBRO DE 2006.p.105.
- VASCONCELOS, S. C. de. **Morfoestratigrafia da planície costeira ao norte do rio Paraíba do Sul (RJ)**. Tese de doutorado – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2016.186 p.
- VEIGA JUNIOR, J. P. **Programa levantamento geológico básico do Brasil. São Luís NE/SE**, folhas SA23-X e SA 23-Z Estados do Maranhão e Piauí. Escala 1:500.000, Brasília: CPRM, 2000, 1CD ROM.
- XAVIER da SILVA, J.; ZAIDAN, R.T. **Geoprocessamento e Análise Ambiental: aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 363p. 2004.